



Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

www.tno.nl

T +31 15 284 30 00
F +31 15 284 39 91
info-DenV@tno.nl

TNO-rapport

TNO-DV 2007 A315

**Responsie van verschillende munitieartikelen bij
opwarming en brand**

Datum	september 2007
Auteur(s)	ir. J.H.G. Scholtes ir. V. Verboom
Rubricering rapport	Ongerubriceerd
Vastgesteld door	G.B. Cornelisse
Vastgesteld d.d.	28 juni 2007 (Deze rubricering wijzigt niet)
Titel	Ongerubriceerd
Managementuittreksel	Ongerubriceerd
Rapporttekst	Ongerubriceerd
Bijlage	Ongerubriceerd
Exemplaarnummer	12
Oplage	19
Aantal pagina's	48 (incl. bijlage, excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen	1

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende ter zake tussen partijen gesloten overeenkomst.

© 2007 TNO

20071113035

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for Public Release
Distribution Unlimited

AQ F08-02-00535

Responsie van verschillende munitieartikelen bij opwarming en brand

Brand geeft op zichzelf al gevaarlijke situaties. Als dit in combinatie met munitie optreedt, worden de gevaren nog groter. De resultaten van dit rapport geven de mogelijkheid de kritische condities van munitie bij brand te bepalen ter ondersteuning van het brandbestrijdingproces.



Probleemstelling

Veiligheid van munitie voor het eigen personeel en materieel onder alle omstandigheden is een van de voorwaarden voor het functioneren van de krijgsmacht. Naar aanleiding van de vuurwerkramp in Enschede wordt er nu binnen de KL gekeken naar de veiligheid van munitieopslagen. Het doel van dit project is het vaststellen van het gedrag van munitieartikelen in brand. Het resultaat kan als basis dienen voor aanbevelingen voor een herziening van de richtlijn MP40 21 en brandweeropleiding.

Beschrijving van de werkzaamheden

Het project is gestart met het ontwikkelen

van een rekenmodel om de cook-off tijden van munitieartikelen te bepalen. Met dit rekenmodel kan een schatting gemaakt worden van de tijd en temperatuur tot explosie en het zogenaamde 'point-of-no-return'. Van een drietal munitieartikelen zijn deze tijd en temperatuur tot explosie bepaald.

Resultaten en conclusies

De tijden en temperaturen tot explosie van de volgende munitieartikelen zijn berekend: 35 mm, 120 mm en de 155 mm. Vervolgens is een vergelijking gemaakt van berekende waarden met literatuurwaarden betreffende thermische responsie van artikelen. De kritische temperatuur waarbij een

munitieartikel zal exploderen hangt sterk af van de opwarmingssnelheid. Voor de meeste conventionele verschoten munitie met de explosieven HMX, RDX en TNT als hoofdbestanddeel en een diameter in de range van 35-155 mm ligt deze grens op een lijn tussen 150 °C bij een opwarming van 0,001 °C/s (3,6 °C/uur) naar 200 °C bij een opwarming van 0,1 °C/s (360 °C/uur) en opwarmingssnelheden daar boven. De tijd die daarmee gepaard gaat is afhankelijk van de temperatuur op moment van aflezen en de opwarmingssnelheid. Kruit reageert sneller. Voor artikelen met kruit ligt deze grens lager, van 105 °C naar 150 °C bij snelheden van 0,001 K/s tot 1 K/s. Voor munitie in een directe brand is uiterste voorzichtigheid geboden. Tijden van minder dan 1 minuut zijn niet vreemd. Om een beter overzicht van de kruit te krijgen zal een grotere variatie van 'snel reagerende kruit' bekeken moeten worden. De meest gangbare explosieven in conventionele munitie (RDX, HMX, TNT en Comp B (RDX/TNT), Comp A3 (RDX) etc.) kunnen op de zo juist genoemde manier benaderd worden. Dit geldt ook voor veel moderne PBXen met als hoofdbestanddeel RDX, HMX of TNT en bindersystemen als HTPB. Ook bijvoorbeeld de moderne 155 munitie van Rheinmetall (met KS32) valt binnen deze normen net als munitie met het veelgebruikte 'blast'-explosief PBX-N109.

Toepasbaarheid

De berekende responsie van de geselecteerde artikelen kunnen als basis dienen voor een richtlijn. Om de responsie goed te bepalen moet het thermisch verleden van de munitie bekend zijn. Dit kan gemeten worden met behulp van elektronische temperatuursensoren in de bunkers. Verder moet bekend zijn, hoeveel en welke soorten munitie

opgeslagen liggen. Naast de voorspelling hoe lang het duurt voordat de munitie reageert, kan er gekeken worden naar de manier waarop de munitie opgeslagen ligt. Wellicht kan de munitie op een veiligere manier opgeslagen worden en kan in geval van een brand de munitie beter benaderd worden van de ene kant als rekening gehouden wordt met de richting van de scherven, drukgolf, etc.

PROGRAMMA

Programmabegeleider
Ltkol J. Paap,
DMO/DWS&B/Ressort Lucht-
systemen & Bedrijven

Programmaleider
ir. G.C. Reeling Brouwer,
TNO Defensie en Veiligheid,
businessunit Bescherming, Munitie
en Wapens

Programmatitel
Munitie: Functivering veiligheid en
milieu

Programmanummer
V405

Programmaplanning
Start 2005
Gereed 2008

Toezichthouder
-

Frequentie van overleg
Met de programma/projectbege-
leider werd 4 maal gesproken over
de invulling en de voortgang van het
onderzoek.

PROJECT

Projectbegeleider
G.B. Cornelisse,
DS/CLAS/St-CLAS/Dir OPOST

Projectleider
ir. J.H.G. Scholtes,
TNO Defensie en Veiligheid,
businessunit Bescherming, Munitie en
Wapens

Projecttitel
Brand in Munitiemagazijnen

Projectnummer
014.16225

Projectplanning
Start 2003
Gereed 2006

Projectteam
ir. J.H.G. Scholtes
ir. V. Verboom

Contact en rapportinformatie

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

T +31 15 284 30 00
F +31 15 284 39 91

info-DenV@tno.nl

TNO-rapportnummer
TNO-DV 2007 A315

Opdrachtnummer
-

Datum
september 2007

Auteur(s)
ir. J.H.G. Scholtes
ir. V. Verboom

Rubricering rapport
Ongerubriceerd

Inhoudsopgave

	Managementuittreksel.....	2
1	Inleiding.....	5
2	Bezoeken munitiemagazijnen.....	6
2.1	Afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie.....	6
2.2	MunitieMagazijnComplex	7
2.3	Conclusies munitieopslagplaatsen.....	9
3	Gebruikt model en parameters	10
3.1	Gebruikt model	10
3.2	Stofafhankelijke eigenschappen als input voor model	12
4	Berekeningen aan geselecteerde munitie	16
4.1	Berekeningen aan explosieven	16
4.2	Berekeningen aan kruiden.....	26
5	Afhankelijkheid van warmtegeleidbaarheid, warmtecapaciteit en dichtheid op de explosietemperatuur en -tijd	32
6	Vergelijking tussen explosieven met hoog en laag RDX gehalte	34
7	Bulkopslag kruid.....	36
7.1	Veilige opslag temperatuur voor kruid.....	36
7.2	T_{cr} volgens Boddington simulatie kubus	36
8	Conclusies en aanbevelingen	38
9	Referenties.....	40
10	Ondertekening	41
	Bijlage(n)	
	A Berekening thermische explosiekubus	

1 Inleiding

Ongelukken in het recente verleden, zoals de vuurwerkramp in Enschede, hebben de aandacht gericht op de opslag van explosieve stoffen en munitieartikelen en de gevaren die dit met zich meebrengt. Door deze ongelukken zijn de verantwoordelijke personen opnieuw gewezen op deze gevaren. Specifiek bij een brand in een munitiemagazijn dient de brandweer bij het verkennen en het blussen van de brand veilig ingezet te kunnen worden. Daarvoor is het noodzakelijk dat zij bekend zijn met het gedrag van de opgeslagen munitie in een brand.

De richtlijnen voor munitiebrandbestrijding zijn vastgelegd in MP 40-21, 'Voorschrift voor opslag gevaarlijke stoffen' en de Brandweeropleiding Brandmeester [5, 6]. De laatste keer dat deze richtlijnen zijn aangepast is na een aantal studies in de periode van 1993-1995 [7, 8]. In veiligheidsstudies wordt aangenomen dat bij een brand in een munitiemagazijn alle aanwezige munitie betrokken is en maximaal zal reageren/detoneren. Er wordt dus van een 'Maximum Credible Event' (MCE) uitgegaan. Dit betekent dat maximale en dus conservatieve veiligheidsafstanden in acht genomen worden. In het laatste decennium is de kennis op het gebied van munitie en explosieve stoffen, en speciaal het gedrag bij een ongewenste reactie, sterk toegenomen. Veel van deze ontwikkelingen komen voort uit het onderzoek naar Insensitive Munitions (Minder Kwetsbare Munitie, MKM). Het doel van MKM is dat de munitie minder heftig reageert als zij ongewenst tot reactie komt. Deze ontwikkelingen betekenen dat veel meer informatie gegeven kan worden over de heftigheid van de reactie van munitie in een brand en de tijdsperiode die verstrijkt voordat deze reactie optreedt. Tevens is het tegenwoordig niet meer noodzakelijk om in alle gevallen van een MCE uit te gaan. Deze informatie is van groot belang voor de verkenning en bestrijding van een munitiebrand. Om deze redenen heeft het Hoofd Brandweezorg van het NATCO te Gouda de behoefte geuit om in kaart te brengen wat nu het *reële* brandgedrag en -effect van (een bulk) munitie kan zijn wanneer deze betrokken zijn bij een brand (cook-off).

Binnen dit project is voor een aantal verschillende munitieartikelen in opslag, afhankelijk van het soort opwarming en daaraan gekoppeld de opwarmsnelheid van deze artikelen, de temperatuur tot reactie bij een brand numeriek bepaald. Om de respons van de munitieartikelen te bepalen zijn eerst fysische eigenschappen van de stoffen in de munitie in de literatuur opgezocht. Voor zover er literatuurgegevens over de responsie van de munitie zijn, zijn deze vergeleken met de bepaalde waarden. Op deze manier is er een grens bepaald waarbij de munitie wel of niet reageert.

Hoofdstuk 2 geeft een samenvatting van de bezoeken aan de Afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie (ABWM) in Oldebroek en het MunitieMagazijnComplex (MMC) in Veenhuizen om een idee te krijgen welke munitie op welke wijze opgeslagen ligt. Hoofdstuk 3 beschrijft het model en de parameters die gebruikt zijn om de tijd en temperatuur tot explosie te bepalen. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van de berekeningen weer van de geselecteerde munitie. Hoofdstuk 5 toont de resultaten van een gevoeligheidstudie met betrekking tot de invoerparameters. Hoofdstuk 6 kijkt naar de verschillen van twee RDX houdende explosieve stoffen waarvan één met 64 wt% RDX en één met 85 wt% RDX, in vergelijking tot experimentele gegevens van cook-off reacties. Hoofdstuk 7 kijkt naar de gevaren bij bulkopslag van met name kruiten. Hoofdstuk 8 besluit met conclusies en aanbevelingen.

2 Bezoeken munitiemagazijnen

Om een goed beeld te krijgen van hoe munitie opgeslagen ligt, zijn de Afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie (ABWM) in Oldebroek en het MunitieMagazijnComplex (MMC) in Veenhuizen bezocht. Een beknopte samenvatting van deze bezoeken staan in de volgende paragrafen, een uitgebreider verslag is te vinden in referentie [2]. De manier waarop met brand omgegaan wordt, kan per land verschillen aangezien elk land zelf verantwoordelijk is voor het eigen brandweerbeleid.

2.1 Afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie

Bij de afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie worden wapensystemen en munitie beproefd op hun functioneren. Er worden onder andere fuel fire proeven, classificatietesten periodiek- en calamiteitenonderzoek uitgevoerd.

De voorraden munitie aanwezig op het complex in Oldebroek liggen opgeslagen in bunkers, zie figuur 2.1. Per bunker staat op de buitenkant welke klasse er opgeslagen ligt (klasse 1: massaexplosief, etc.). De huidige regels over barrières en afstanden die op het terrein gelden zijn in de MP40-21 richtlijnen vastgelegd. De bunkers zijn over het algemeen genomen niet vol; de munitie is in kleine hoeveelheden aanwezig. Wel zijn er veel verschillende soorten munitie aanwezig, zie figuur 2.2. De munitie die tijdens de testdag gebruikt wordt, wordt in kleinere hoeveelheden opgeslagen als dagopslag in een aparte ruimte in het bewerkingsgebouw. De hoeveelheden munitie die opgeslagen ligt, is bekend en wordt bijgehouden.



Figuur 2.1 Opslagbunker bij de afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie in Oldebroek.



Figuur 2.2 De bunker ligt niet geheel vol, verschillende testmaterialen worden hier opgeslagen.

In geval van een brandmelding wordt het terrein overgedragen aan de gemeentelijke brandweer. De gemeentelijke brandweer is verantwoordelijk voor het blussen van de brand. De brandweer wordt ingelicht door iemand van het ABWM over de plaatsen waar welke soort munitie ligt. Op dit moment zijn de afstanden die gehouden moeten worden in geval van brand bepaald op basis van de vergunningen over hoeveel er maximaal mag liggen en niet op basis van de hoeveelheden die er werkelijk aanwezig zijn. In geval van brand ontruimen de mensen van het ABWM. De brandweer gaat wel het terrein op, maar houdt zich aan de geldende richtlijnen; de procedure in geval van brand in een magazijn is 1000 m afstand houden en wachten.

Bij de Afdeling Beproeving van Wapensystemen en Munitie brengt vooral het bewerken en het testen van de munitie risico's met zich mee. Wanneer de munitie opgeslagen ligt in een bunker is er maar een kleine kans dat er iets gebeurt. Bij het ABWM is er gesproken om in elke ruimte camera's aan te brengen. De videobeelden kunnen dan laten zien wat er gaande is in de ruimtes. Helaas bleek dat dit systeem veel te duur was (ongeveer EUR 6.000.000,-) om te kunnen uitvoeren.

2.2 MunitieMagazijnComplex

In Nederland zijn er op verschillende plaatsen munitiemagazijncomplexen. De munitie ligt opgeslagen in bunkers. De belading van de bunkers is bekend via het MUNIS systeem. Wanneer de veranderingen van een bunker groter dan 10% zijn, wordt het systeem bijgewerkt. In de bunkers in Veenhuizen ligt meer opgeslagen dan in de bunkers in Oldebroek. Figuur 2.3 laat een volle opslagbunker zien.

In elke bunker hangt een overzicht wat er maximaal aan gewicht van een bepaalde klasse mag liggen. Daarnaast bevinden zich in elke bunker de procedures voor ontruiming en de procedure wat te doen bij brand. De verpakking waarin de munitie opgeslagen ligt, is niet voor elk artikel gelijk: het meest gebruikt is hout geïmpregneerd met brandvertragers.



Figuur 2.3 In de bunkers in Veenhuizen ligt meer munitie opgeslagen dan in de bunkers in Oldebroek.

Voor transport wordt de munitie in containers geladen. De bunkers zijn zo groot dat beladen containers in de bunker passen, zie figuur 2.4. De containers worden maar met 1 laag munitie geladen. Om te voorkomen dat de munitie gaat schuiven wordt een container helemaal ingebouwd met hout. Op deze manier kan de container ook op zijn kop geplaatst worden zonder dat er schade ontstaat aan de artikelen. Op de plaats van bestemming wordt de munitie uit de container gehaald en opgeslagen volgens de richtlijnen.



Figuur 2.4 Containers met munitie die klaar staan voor transport worden ook opgeslagen in bunkers.

De brandweer op het complex heeft een aanvalsplan geschreven over hoe te handelen bij brand. Hierin staat vermeld dat er gekeken moet worden waar de betreffende brand is en welke klasse munitie er opgeslagen ligt. Dit aanvalsplan is zowel bij de bedrijfsbrandweer als bij de gemeentelijke brandweer bekend. Een aantal mensen van de bedrijfsbrandweer zit ook in de gemeentelijke brandweer, hierdoor is het contact tussen beide brandweerdiensten goed. Het aanvalsplan bevat veiligheidscirkels die in acht genomen worden bij brand. Ook hier geldt de MP40-21.

Op het terrein in Veenhuizen zijn twee werkplaatsen. Wanneer er munitie aanwezig is, mogen de werkplaatsen alleen betreden worden met speciale (anti-statische) schoenen. Bij elke werkplek is een brandblusser aanwezig. De muren tussen de werkplekken zijn zo ontworpen dat deze moeten blijven staan in geval van een explosie. De achterwand wordt wel naar buiten geblazen. Bij iedere werkplek hangt een camera om te registreren wat er gebeurt.

2.3 Conclusies munitieopslagplaatsen

In Nederland wordt op verschillende plaatsen munitie opgeslagen. De bunkers op de opslaglocaties liggen aanzienlijk voller dan de bunkers bij afdelingen waar onderzoek gedaan wordt. De richtlijnen van de MP40-21 gelden op alle locaties. Tijdens vredesoperaties worden de regels in acht gehouden zoals beschreven in de materieellogistieke instructie 'Munitieveiligheid tijdens vredesoperaties'.

Op dit moment zijn er in de bunkers geen camera's en temperatuursensoren, die op afstand uitgelezen worden. Het wordt aanbevolen om wel camera's en temperatuursensoren te plaatsen zodat op afstand mogelijke opwarming geïdentificeerd kan worden en de aard en locatie van deze opwarming bepaald kan worden. Na aflezing van de geregistreeerde temperatuur en de daaruit afgeleide opwarmsnelheid kan eventueel besloten worden of er nog actie genomen wordt om de brand te blussen of dat er op een afstand van 1000 m gewacht wordt tot dat een eventuele explosie heeft plaatsgevonden.

3 Gebruikt model en parameters

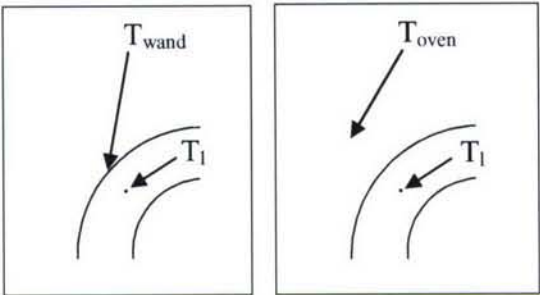
Om de responsietemperatuur van verschillende munitieartikelen te bepalen wordt een 1-dimensionaal model gebruikt. Dit model heeft verschillende eigenschappen van de stoffen in de munitie nodig. In paragraaf 3.1 wordt het model kort besproken. In paragraaf 3.2 worden de parameters van de stoffen besproken.

3.1 Gebruikt model

Wanneer een munitieartikel in of nabij een brand ligt, zal deze opwarmen. Door deze opwarming kan het energetische materiaal in het artikel gaan reageren. Wanneer er door deze reactie meer warmte geproduceerd wordt dan dat er aan de omgeving afgestaan wordt, zal het artikel opwarmen, ontsteken en eventueel exploderen. Deze opwarming kan op verschillende manieren gesimuleerd worden. In Scholtes [3] en [4] worden verschillende modellen beschreven waaronder het 1-dimensionale simulatiemodel, geïmplementeerd in het spreadsheetprogramma Microsoft Excel 2002. De modellen zijn ontwikkeld voor zowel de Koninklijke Landmacht als voor de Koninklijke Marine. Het 1-dimensionale model bevat 4 verschillende soorten berekeningen, namelijk 4 verschillende manieren van opwarming. De eerste is opwarming door middel van vrije convectorie; ofwel een natuurlijke opwarming aan de lucht. De tweede manier van opwarming is opwarming door middel van direct contact, bijvoorbeeld een verwarmingsspiraal om het artikel heen. De derde manier is de bepaling van het 'point of no return'. Hierbij wordt de minimale temperatuur gezocht waarbij het artikel nadat de opwarming van buitenaf gestopt is (bijvoorbeeld de brand is geblust) toch nog zijn ontsteektemperatuur bereikt. De laatste vorm is opwarming door middel van straling van vuur. Figuur 3.1 geeft de lay-out van de spreadsheet weer.

Een ander gebruikte methode is een bestaand 1-dimensionaal pakket dat door TNO ontwikkeld is (GSCO) waarmee direct opwarming van munitie doorgerekend kan worden. Helaas is het met deze code niet mogelijk een raketmotor door te rekenen of opwarming aan de lucht die langzaam warmer wordt.

Tijdens de berekeningen wordt gezocht naar het tijdstip waarbij het explosief zijn ontsteektemperatuur bereikt. Wanneer ergens in het explosief de ontsteektemperatuur van dit explosief bereikt wordt, wordt de wandtemperatuur/oventemperatuur afgelezen. Bij de directe opwarming wordt de wandtemperatuur opgelegd en bij opwarming via convectie wordt de omgevingstemperatuur/oventemperatuur opgelegd. Zie figuur 3.2 voor een illustratie van de wand- en oventemperatuur. De opwarming via convectie laat de opwarming van reële situaties zien.



Figuur 3.2 Opwarming via direct contact = opgelegde wandtemperatuur (links) en via convectie = opgelegde omgevingstemperatuur (rechts).

3.2 Stofafhankelijke eigenschappen als input voor model

3.2.1 Explosieven

In het model zijn eigenschappen van de stof nodig. Voor explosieven zijn veel van deze gegevens bekend. In tabel 3.2 staan de gebruikte waarden voor de stoffen die voorkomen in granaten, waarvan de tijd tot explosie en de temperatuur van de wand berekend is.

Tabel 3.2 Stofafhankelijke eigenschappen van de explosieven gebruikt in de berekeningen.

Parameter	Symbool	Eenheid	TNT Ref. [11]	RDX (RU81) Ref. [12]	HMX (HU27) Ref. [12]
Warmtegeleid- baarheid	λ	W/(m·K)	0,2092	0,25	0,317
Dichtheid	ρ	kg/m ³	1570	1580	1640
Warmtecapaciteit	C_p	J/(kg·K)	1500	1360	1277
Reactiewarmte	Q	J/kg	1255200	2088890·0,85 ¹	2343400·0,87 ¹
Pre-exponentiële coëfficiënt	Z	1/s	2,510·10 ¹¹	3,16228·10 ¹⁸	5,0·10 ¹⁹
Activerings- energie	E_a	J/mol	143900	199000	220290
Ontsteek- temperatuur	$T_{ontsteek}$	°C	297	203	275

¹ De compositie bestaat voor deze fractie uit het explosief.

3.2.2 Kruiden

Om de responsietemperatuur en tijd te bepalen van de voortdrijvende lading en de klein kaliber munitie is het nodig om de stofeigenschappen van het kruid te weten. Eigenschappen zoals de warmtegeleidbaarheid, λ , en de dichtheid, ρ , zijn hierbij lastig te bepalen. De warmtegeleidbaarheid wordt namelijk beïnvloed door de lucht die tussen het kruid zit. De vorm van het kruid heeft hier ook invloed op. Wanneer het kruid dichter

op elkaar gestort is, zal de warmtegeleidbaarheid meer en meer lijken op de waarde van de warmtegeleidbaarheid van het kruit zelf. Om een goed beeld te krijgen moet in het model gerekend worden met een waarde die ligt tussen die van massief kruit en die van lucht. Een aanneemelijk range voor de geleidbaarheid is van 0,06 tot 0,3 W/m-K. Voor de dichtheid geldt een gelijke redenatie. De lucht tussen het kruit zorgt ervoor dat de schijnbare dichtheid van het artikel lager is dan de dichtheid van het kruit zelf. Aanneemelijke waarden voor de dichtheid zijn 200 tot 900 kg/m³. De warmtecapaciteit varieert iets minder en ligt in de range van 1300 tot 1500 J/kg-K.

De parameters zoals de pre-exponentiële factor en de activeringsenergie zijn lastiger vast te leggen in een range. De pre-exponentiële factor en de activeringsenergie zijn aan elkaar gekoppeld en mogen niet zomaar los van elkaar gevarieerd worden. Een bijkomend aspect is dat kruit (nitrocellulose) op zichzelf geen stabiele stof is. De -O-NO₂ binding breekt waardoor er radicalen vrijkomen. Deze radicalen reageren vervolgens weer met een ander nitro-oxide groep waardoor uiteindelijk het kruit thermisch wegloopt. Om deze reactie te vertragen/voorkomen wordt er een stabilisator toegevoegd aan het kruit. De hoeveelheid stabilisator wordt in de loop van de tijd verbruikt. De stabilisator wordt verbruikt door het afvangen van de radicalen en voorkomt op deze manier de kettingreactie. Door het toevoegen van een stabilisator wordt de activeringsenergie van het kruit verhoogd. Voor de berekeningen is het belangrijk om te weten hoe de activeringsenergie (gekoppeld aan de pre-exponentiële factor) zich verhouden. Wat nu de waarden van het kruit zijn, is moeilijk te bepalen. Deze worden beïnvloed door de stabilisator. De waarden van de stabilisator zijn dus van groot belang omdat ze de reactiekinetiek veranderen. In de literatuur zijn weinig gegevens bekend over de reactiekinetiek van kruiden al dan niet met stabilisator. Daarom is het lastig om 'juiste' waarden te bepalen voor de berekening van de responsie van het kruit. Hierbij komt nog dat de hoeveelheid stabilisator die het kruit bevat op het moment van cook-off niet bekend is en in de praktijk natuurlijk varieert.

De eigenschappen van het kruit kunnen variëren in de orde van groottes zoals vermeld in tabel 3.3. In overleg met de toenmalige projectbegeleider ir. M. Pot is besloten om in dit rapport een bandbreedte te bepalen door verschillende eigenschappen in te schatten. Door een 'worst case' en een 'best case' te maken, kan een brandbreedte van de responsie gemaakt worden. Voor de activeringsenergie, de reactiewarmte en de pre-exponentiële factor zijn waarden geschat met behulp van de gemiddelde warmte productie van kruiden gemeten in Heat Flow Calorimetry (HFC) experimenten bij 85 °C. Deze warmteproductie is gecombineerd met een activeringsenergie wat leidt tot 4 situaties. Men zou verwachten dat bij een hoge activeringsenergie het kruit het meest stabiel is. Echter uit de berekeningen bleek dat een hoge activeringsenergie gecombineerd met een lage warmteproductie bij 85 °C leidde tot een hogere energieproductie dan bij een lagere activeringsenergie. Daarom zijn beide cases doorgerekend. Bij de hoge warmteproductie bij 85 °C geldt hetzelfde, ook hier zijn beide cases berekend. De overige eigenschappen van kruit best case 1 en 2 zijn als een heel gunstig kruit genomen, uit het oogpunt voor de cook-off. Dit zijn de hoogste waarden voor de warmtegeleidbaarheid, de dichtheid en de warmtecapaciteit. Voor de eigenschappen van kruit worst case 1 en 2 zijn hiervoor juist de laagste waarden genomen.

Tabel 3.3 Stofeigenschappen van kruiden.

	Symbol	Eenheid	Best case 1	Best case 2	Worst case 1	Worst case 2
Warmtegeleidbaarheid	λ	W/m·K	0,3	0,3	0,06	0,06
Dichtheid	ρ	kg/m ³	900	900	200	200
Warmtecapaciteit	C_p	J/kg·K	1500	1500	1300	1300
Pre-exponentiële coëfficiënt·Reactiewarmte	$Z \cdot Q^{\dagger}$	W/kg	$5,518 \cdot 10^{14}$	$2,443 \cdot 10^{18}$	$4,415 \cdot 10^{15}$	$1,954 \cdot 10^{19}$
Activeringsenergie	E_a	J/mol	110000	135000	110000	135000
Ontsteektemperatuur	T_{ontsteek}	°C	160	160	160	160

[†] De waarden van Z en Q zijn samengenomen.

Deze geschatte waarden zijn vergeleken met de waarden uit de literatuur. Tabel 3.4 laat de eigenschappen van kruid KB6954 en kruid C zien die overgenomen zijn uit [1]. Kruid M bevat de eigenschappen die overgenomen zijn uit [10].

Tabel 3.4 Stofeigenschappen van kruiden.

Parameter	Symbol	Eenheid	KB6954 [1]	Kruid C [1]	Kruid M [10]
Warmtegeleidbaarheid	λ	W/m·K	0,08	0,08	0,08
Dichtheid	ρ	kg/m ³	840	840	840
Warmtecapaciteit	C_p	J/kg·K	1350	1350	1350
Pre-exponentiële coëfficiënt·Reactiewarmte	$Z \cdot Q^{\dagger}$	W/kg	$5,782 \cdot 10^{16}$	$1,608 \cdot 10^{17}$	$3,54 \cdot 10^{18}$
Activeringsenergie	E_a	J/mol	122700	120000	188200
Ontsteektemperatuur	T_{ontsteek}	°C	160	160	160

[†] De waarden van Z en Q zijn samengenomen.

Over het cook-off gedrag van kruiden is weinig kennis beschikbaar. Het schatten of bepalen van de parameters die nodig zijn om het gedrag te voorspellen is lastig. Echter over de levensduur van kruiden is meer bekend. Om een voorspelling over de levensduur te doen wordt er gekeken naar de warmteproductie bij 85 °C zoals hierboven vermeld. In combinatie hiermee wordt er ook gekeken naar het verbruik van de stabilisator. Om een schatting van het cook-off gedrag te kunnen doen, kan ook bepaald worden hoe lang het duurt tot de stabilisator verbruikt is. Aangenomen wordt dat het kruid gaat reageren wanneer de stabilisator verbruikt is. Om de levensduur te bepalen wordt de tijd geschat aan de hand van vergelijking (1).

$$t_m = t_s \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m}\right)\right)$$

(1)

- waarin:
- t_s = veilige levensduur bij omgevingstemperatuur [s];
 - t_m = duur van de meting [s];
 - T_s = omgevings-/opslagtemperatuur [K];
 - T_m = meettemperatuur [K].

Hierbij wordt verder aangenomen dat de warmteproductie en de stabilisatorconsumptie verlopen volgens de wet van Arrhenius, het kruid de temperatuur van de omgeving heeft en dat het reactiepad bij verschillende temperaturen gelijk is.

De voortdrijvende lading wordt geïnitieerd door een slaghoedje met een vlampijp. De vlampijp bevat voornamelijk nitrocellulose, de grootste component in het kruit. De compositie in het slaghoedje is over het algemeen een initiaalspringstof. De springstoffen zijn gevoelig voor stoot en soms ook wrijving. Echter op thermisch gebied zijn deze stabiel. Hierdoor zal door thermische stimuli het initiatiegedeelte waarschijnlijk pas later ontsteken dan het kruit. Daarom zijn deze stoffen buiten de beschouwing van dit project gehouden.

4 Berekeningen aan geselecteerde munitie

Er worden veel verschillende artikelen gebruikt bij de landmacht. Er is een selectie van de meest gebruikte munitie gemaakt om de hoeveelheid berekeningen beperkt te houden. De volgende artikelen zijn geselecteerd: de Howitzer munitie (155 mm), de 120 mm mortier en de 35 mm patronen. Zowel de Howitzer als de 120 mm bevatten een granaat met een explosieve stof alswel een voortdrijvende lading bestaande uit kruit. Bij de Howitzer is dit kruit verpakt in kardoezen, terwijl bij de 120 mm patronen het kruit in een huls zit en bij de 120 mm mortieren bestaat het kruit uit ringen. De berekeningen aan de granaten van de Howitzer en 120 mm mortier worden in paragraaf 4.1 besproken. Paragraaf 4.2 bespreekt de berekeningen aan het kruit.

4.1 Berekeningen aan explosieven

4.1.1 Granaat van 155 mm

De 155 mm munitie (Howitzer munitie) bestaat uit een granaat met TNT als explosieve stof, die weggeschoten wordt met behulp van een kardoes. Het kardoes bevat kruit. De thermische responsie van het kruit wordt besproken in paragraaf 4.2.



Figuur 4.1 155 mm granaten worden verschoten met een Howitzer.



Figuur 4.2 155 mm granaat.

Om de explosietijd en temperatuur van de granaat te berekenen, is de granaat gesimuleerd als een cilinder bestaande uit TNT met en zonder een stalen omhulling. De stofeigenschappen van TNT zijn overgenomen van Victor [11]. In tabel 4.1 staan de gegevens voor de verschillende stralen. De cilinder wordt gesimuleerd als een massieve TNT cilinder daarom is de straal van de ‘bore’ (gebruikt bij berekeningen aan een raket) gelijk aan 0. De straal tussen de propellant en de liner is zo verdeeld dat de ruimtestappen in de berekening gelijk verdeeld worden. Tijdens de berekeningen wordt gezocht naar het tijdstip waarbij het explosief, in dit geval TNT, zijn ontsteektemperatuur bereikt.

Tabel 4.1 Invoergegevens voor de straal voor de 155 mm granaat met TNT.

Parameter	Eenheid	Waarde
R_b	m	0
R_p	m	0,0568
R_l	m	0,0775

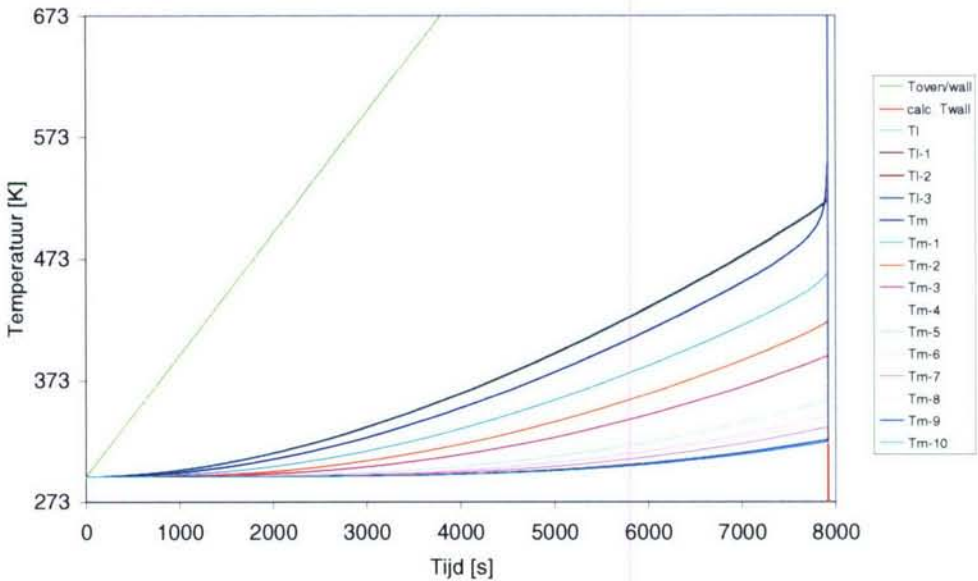
Tabel 4.2 laat explosietemperaturen zien bij verschillende simulaties, de opwarming vindt plaats via convectie of direct contact (conv versus direct) met of zonder stalen wand (sw versus kaal). Naast het gebruikte model zoals beschreven in hoofdstuk 3 is er een tweede model (GSCO) gebruikt. Dit model (1-dimensionale TNO code geschreven

in Delphi/Pascal) is beperkt (kan alleen opwarming via direct contact, maar bevat wel een stalen wand), maar is ter verificatie van de resultaten van het ontwikkelde model opgenomen. De berekening met de opwarming via convectie zonder wand (kaal) gaf geen betrouwbare resultaten en is daarom weggelaten in het rapport. De wand die bij echte munitie aanwezig is heeft te veel invloed op de berekeningen. De $T_{no\ return}$ is de temperatuur waarbij het artikel nadat het uit het vuur gehaald is toch nog tot reactie komt. De temperatuur van het point of no return is moeilijk te bepalen met de ontwikkelde spreadsheet. Ook hier heeft de wand van staal een grote invloed op deze berekening. Met de 1-dimensionale code GSCO is deze bepaald via directe opwarming. De temperaturen van het point of no return liggen echter dicht bij de temperatuur waarbij het artikel reageert. Bij langzamere opwarming liggen deze temperaturen iets lager maar het is in de praktijk niet aan te raden om nog in te grijpen wanneer het artikel deze temperatuur bereikt heeft. Echter het bewustzijn dat het artikel nadat het deze temperatuur heeft bereikt alsnog kan exploderen terwijl de opwarming van buitenaf al weg is, is belangrijk. In paragraaf 4.1.2 zal dit aan de hand van figuren geïllustreerd worden.

Tabel 4.2 Temperatuur van de wand op moment van explosie bij verschillende opwarmsnelheden (opwarming door convectie (conv) en direct contact (direct) met en zonder stalen wand (sw versus kaal) en met behulp van GSCO) voor de 155 mm granaat met TNT.

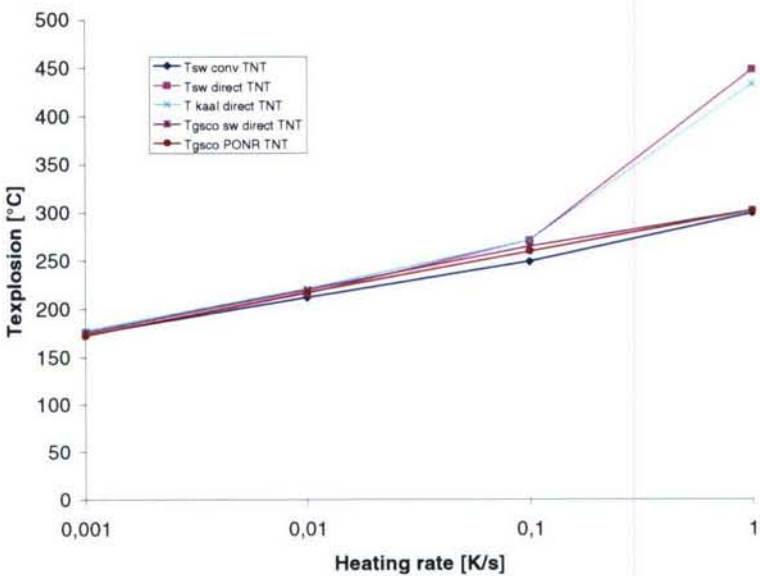
β [K/s]	$T_{sw\ conv}$ [°C]	$T_{sw\ direct}$ [°C]	$T_{kaal\ direct}$ [°C]	$T_{GSCO\ sw\ direct}$ [°C]	$T_{GSCO\ no\ return}$ [°C]
1	298	447	432	301	301
0,1	248	270	270	264	259
0,01	211	216	220	219	217
0,001	173	177	177	175	172

In figuur 4.3 is een voorbeeld te zien van het temperatuurverloop van de 155 mm granaat bij een opwarming van 0.1 K/s door vrije convectie, waarbij de temperatuur T_1 de temperatuur in de buitenste gesimuleerde cel is en T_{m-10} de temperatuur van de binnenste gesimuleerde cel in de granaat. Tijdens de berekening wordt er geen rekening gehouden met het smelten en eventueel koken van het TNT.



Figuur 4.3 Voorbeeld van een resultaat van een berekening aan een 155 mm granaat gevuld met TNT waarbij het artikel door lucht opgewarmd wordt (0,1 °C/s).

Figuur 4.4 geeft de explosietemperaturen als functie van de opwarmsnelheid grafisch weer. Het is duidelijk te zien dat de methode via de ‘stalen wand berekening’ (Tsw con) de laagste waarden voor de verschillende opwarmsnelheden oplevert. De waarden liggen allemaal boven deze donkerblauwe curve (voorzien van een ruit). Dit is de worst case.



Figuur 4.4 Explosietemperatuur van de 155 mm granaat met TNT als functie van de opwarmsnelheid aan de hand van de verschillende methoden.

Voor extreem snelle opwarming (artikel direct in vuur) is het beter om naar berekeningen te kijken via straling van het vuur. In tabel 4.3 is hiervan het resultaat gegeven. Hierbij is straling de belangrijkste term en loopt binnen 60 seconden de temperatuur op naar 1300 K. Hierdoor zal het artikel naar schatting in 71 seconden reageren. Echter hierbij en ook bij bovenstaande berekeningen moet nog in acht genomen worden dat TNT bij 80 graden smelt. Dit is niet in de berekeningen meegenomen (te complex). Dit kan eventueel nog vertragend werken maar zal niet extreem zijn.

Tabel 4.3 Tijd en temperatuur tot explosie bij opwarming via directe warmtestraling van vuur, voor de 155 mm granaat met TNT.

β [K/s]	t_{explosie} [s]	T_{oven} [°C]	T_{wand} [°C]
N.v.t.	71	1027	434

4.1.2 Granaat van de 120 mm

De 120 mm munitie bestaat globaal uit twee delen met een aparte lading; een gedeelte met een springlading en een gedeelte met een voortdrijvende lading. Figuur 4.5 en 4.7 laten een 120 mm mortier zien, de ringen met kruit zijn duidelijk te zien. Figuur 4.6 laat een aantal 120 mm patronen zien. Het bovenste deel is de granaat en het onderste deel is de huls met de voortdrijvende lading. De voortdrijvende lading wordt in paragraaf 4.2 besproken. De springlading komt in deze paragraaf aan bod. Als voorbeeld wordt de lading van een DM12 patroon genomen. De lading bestaat uit een mengsel van 1,8 kg Compositie B (RDX en TNT). Het patroon heeft een dikwandig stalen granaatlichaam.



Figuur 4.5 Mortier 120 mm.



Figuur 4.6 Voorbeelden van 120 mm patronen.



Figuur 4.7 Voorbeeld van een 120 mm mortier.

Fröta en Bailey [13] hebben thermische analyses gedaan met mengsels van RDX en TNT. De resultaten geven aan dat mengsels in de verhoudingen 40:60 tot 0:100 RDX:TNT het gedrag vertonen van TNT. Mengsel in de overige verhoudingen (100:0 tot 40:60) vertonen het gedrag van RDX. Compositie B, de formulering van de granaat in een 120 mm patroon bestaat uit 60% RDX en 40% TNT. Aan de hand van bovenstaande referentie kan aangenomen worden dat compositie B gesimuleerd kan worden alsof het alleen uit RDX bestaat. Om een vergelijking te maken tussen RDX en TNT is de responsie voor TNT ook bepaald.

Tabel 4.4 Invoergegevens voor de 120 mm granaat met RDX of TNT.

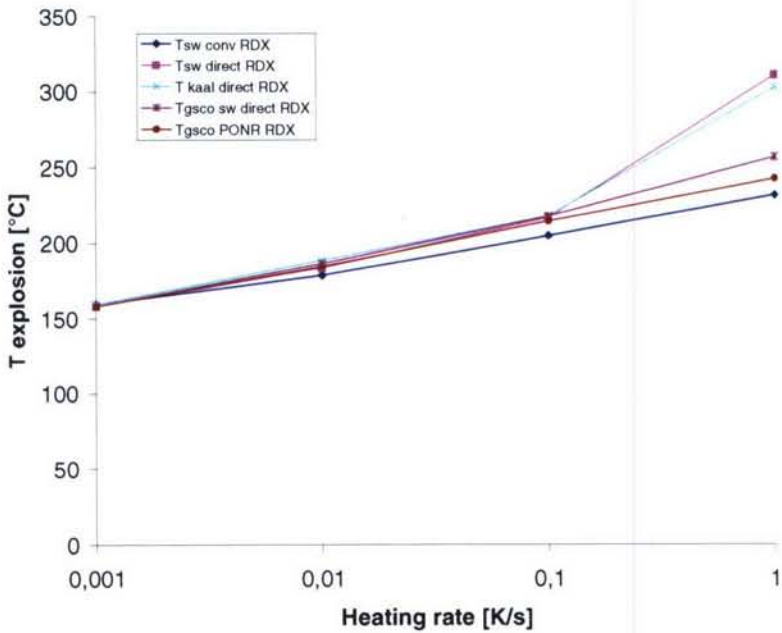
Parameter	Eenheid	Waarde
R_b	m	0
R_p	m	0,044
R_l	m	0,060

Tabel 4.5 laat explosietemperaturen zien bij verschillende simulaties. De opwarming vindt plaats via convectie of direct contact. Net als bij de vorige berekening is het tweede model (GSCO) gebruikt ter verificatie.

Tabel 4.5 Temperatuur van de wand op moment van explosie bij verschillende opwarmingsnelheden (opwarming door convectie (conv) en direct contact (direct) met en zonder stalen wand (sw) en met behulp van GSCO) voor de 120 mm granaat met RDX.

β [K/s]	$T_{sw\ conv}$ [°C]	$T_{sw\ direct}$ [°C]	T_{direct} [°C]	$T_{GSCO\ sw\ direct}$ [°C]	$T_{no\ return\ spreadsheet}$ [°C]	$T_{no\ return\ GSCO}$ [°C]
1	231	310	302	256	242	242
0,1	204	216	217	217	218	214
0,01	178	183	188	186	202	184
0,001	159	158	159	158	157	158

In figuur 4.8 zijn de temperaturen van de explosie voor een 120 mm granaat voor de verschillende methoden bij elkaar gezet. De waarden liggen allemaal boven de blauwe curve (voorzien van een ruit). Dit is de worst case.



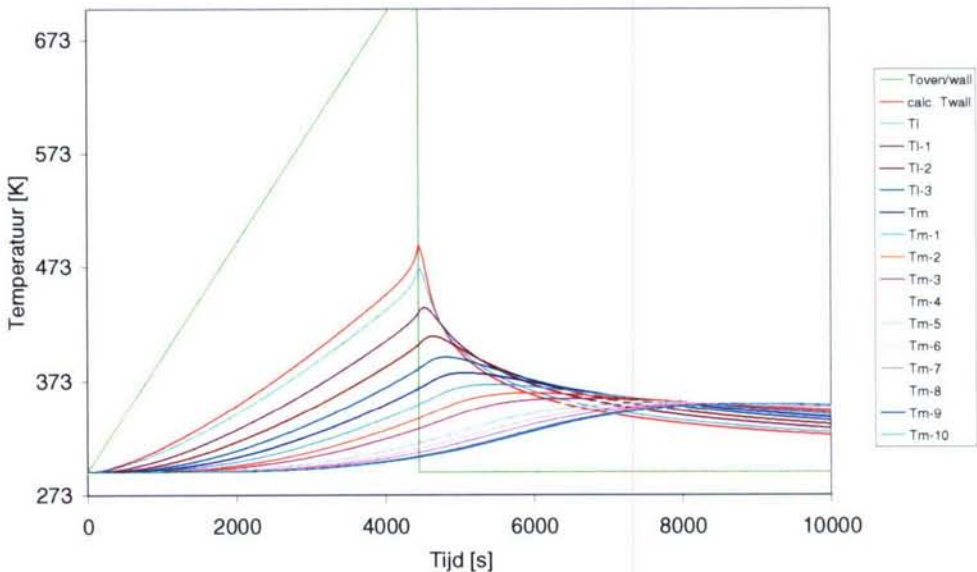
Figuur 4.8 Explosietemperatuur van de 120 mm granaat met RDX als functie van de opwarmingsnelheid aan de hand van de verschillende methoden.

Voor extreem snelle opwarming (artikel direct in vuur) is het beter om naar berekeningen te kijken via straling van het vuur. In tabel 4.6 is hiervan het resultaat gegeven. Hierbij is straling de belangrijkste term en loopt binnen 60 seconden de temperatuur op naar 1300 K. Hierdoor zal het artikel naar schatting in 56 seconden reageren.

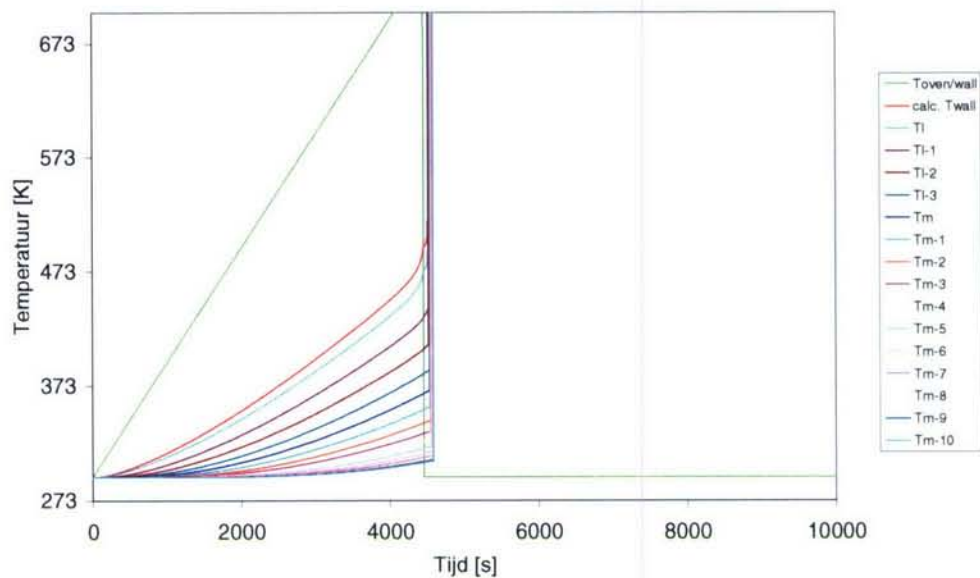
Tabel 4.6 Tijd en temperatuur tot explosie via opwarming door straling van een brand, voor de 120 mm granaat met RDX.

β [K/s]	t_{explosie} [s]	T_{oven} [°C]	T_{wand} [°C]
N.v.t.	57	976	291

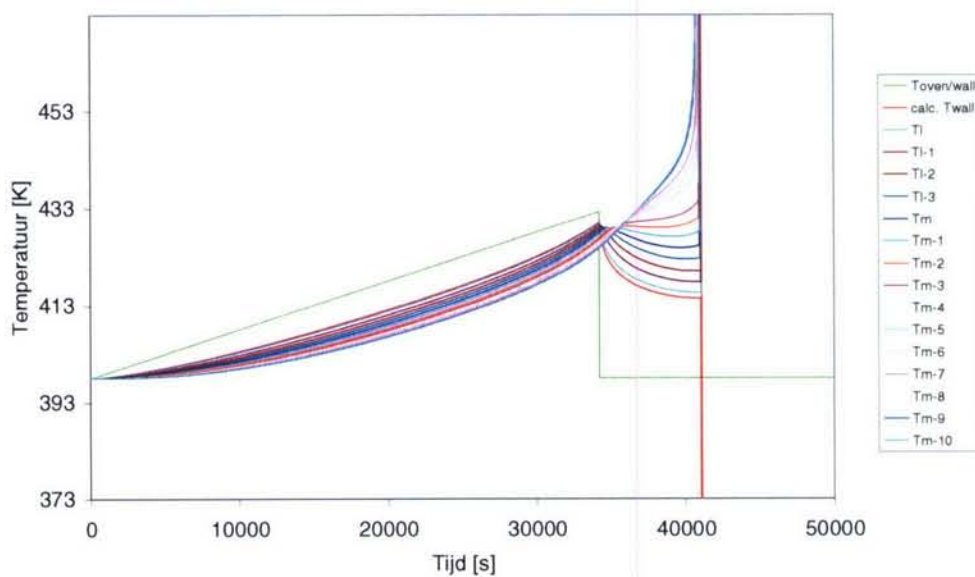
De $T_{\text{no return}}$ is de temperatuur waarbij het artikel nadat het uit het vuur gehaald is nog niet explodeert. Met de waarden uit tabel 4.5 zijn figuur 4.9, 4.10 en 4.11 gemaakt. Figuur 4.9 laat het temperatuurprofiel zien waarbij het artikel nog net niet reageert bij een opwarming van 0,1 K/s, dit is 1 °C onder $T_{\text{no return}}$. Figuur 4.10 laat het profiel zien waarbij het artikel net explodeert bij een opwarming van 0,1 K/s. Bij de opwarm-snelheid van 0,001 K/s is na opwarming tot een temperatuur van 157 °C ofwel 430 K (zie grafiek 4.11 en tabel 4.5), de temperatuur van het explosief vrijwel homogeen. Doordat het artikel uit de warmte gehaald wordt, koelt de buitenwand al af en zakt deze temperatuur, terwijl binnen in het explosief door zelfopwarming het explosief steeds warmer wordt tot dat een explosie optreedt, zie figuur 4.11. De waarden van GSCO en de spreadsheetberekening liggen hier vrij goed bij elkaar, behalve bij de waarde van 0,01 °C/s. Deze waarde is te hoog uitgevallen in de spreadsheet omdat er meer rekenstappen nodig zijn in een spreadsheet (>16000, dus rekenkundig probleem van de spreadsheet). Bovenstaande figuren illustreren dat het goed is om bewust te zijn van het feit dat het artikel, nadat het deze temperatuur heeft bereikt, alsnog kan exploderen terwijl de opwarming van buitenaf al weg is.



Figuur 4.9 Het artikel koelt weer af, $\beta = 0,1$ K/s, opwarming via convector voor de 120 mm granaat met RDX.



Figuur 4.10 Nadat het artikel uit het vuur is, reageert het alsnog, $\beta = 0,1$ K/s, opwarming via convectie voor de 120 mm granaat met RDX.



Figuur 4.11 Nadat het artikel uit het vuur is, reageert het alsnog, $\beta = 0,001$ K/s, terwijl de wand aan het afkoelen is; opwarming via convectie voor de 120 mm granaat met RDX.

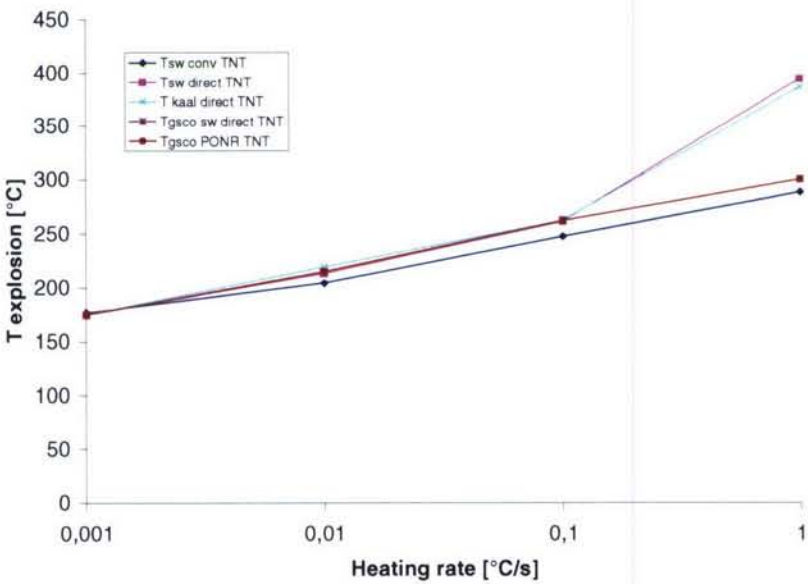
Berekeningen met TNT

Tabel 4.7 laat explosietemperaturen zien bij verschillende simulaties, de opwarming vindt plaats via convectie of direct contact. Net als bij de vorige berekeningen is het tweede model (GSCO) gebruikt ter verificatie.

Tabel 4.7 Temperatuur van de wand op moment van explosie bij verschillende opwarm snelheden (opwarming door convectie (conv) en direct contact (direct) met en zonder stalen wand (sw) en met behulp van GSCO) voor de 120 mm granaat met TNT.

β [K/s]	$T_{sw\ conv}$ [°C]	$T_{sw\ direct}$ [°C]	$T_{kaal\ direct}$ [°C]	$T_{GSCO\ sw\ direct}$ [°C]	$T_{no\ return\ spreadsheet}$ [°C]	$T_{no\ return\ GSCO}$ [°C]
1	288	394	386	300	296	300
0.1	247	261	262	262	265	258
0.01	204	213	219	215	240	211
0.001	177	175	175	175	173	173

In figuur 4.12 is de temperatuur van de explosie voor een 120 mm granaat met TNT voor de verschillende methoden bij elkaar gezet. De waarden liggen allemaal boven de blauwe curve (voorzien van een ruit). Dit is de worst case.



Figuur 4.12 Explosietemperaturen als functie van de opwarm snelheid voor TNT voor een 120 mm granaat.

De $T_{no\ return}$ temperaturen zijn in tabel 4.7 gegeven en vergeleken met de resultaten van GSCO. De resultaten van deze laatste liggen dicht bij de explosietemperaturen. Ook hier geldt dezelfde conclusie als voor de RDX berekeningen. De point of no return temperaturen liggen erg dicht bij de reactietemperaturen. Men zal rekening moeten houden met het alsnog reageren van de artikelen als deze wel tot de point of no return temperatuur opgewarmd zijn terwijl daarna de opwarming al gestopt is.

Voor extreem snelle opwarming (artikel direct in vuur) is het nog beter om naar berekeningen te kijken via straling van het vuur. In tabel 4.8 is hiervan het resultaat gegeven. Hierbij is duidelijk dat al na 81 seconden een explosie kan optreden. Echter hierbij en ook bij bovenstaande berekeningen moet nog in acht genomen worden dat TNT bij 80 graden smelt. Dit is niet in de berekeningen meegenomen (te complex). Dit kan eventueel nog vertragend werken, maar zal niet extreem zijn.

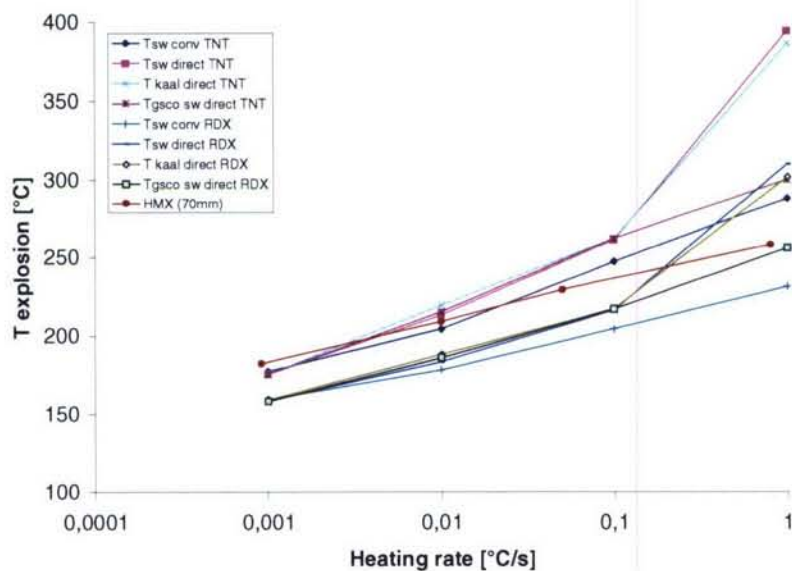
Tabel 4.8 Tijd en temperatuur tot explosie bij direct contact (met vlammen) van het munitieartikel in een brand (opwarming door straling), voor de 120 mm granaat met TNT.

β [K/s]	$t_{explosie}$ [s]	T_{oven} [°C]	T_{wand} [°C]
N.v.t.	81	947	382

Samenvattend 120 mm

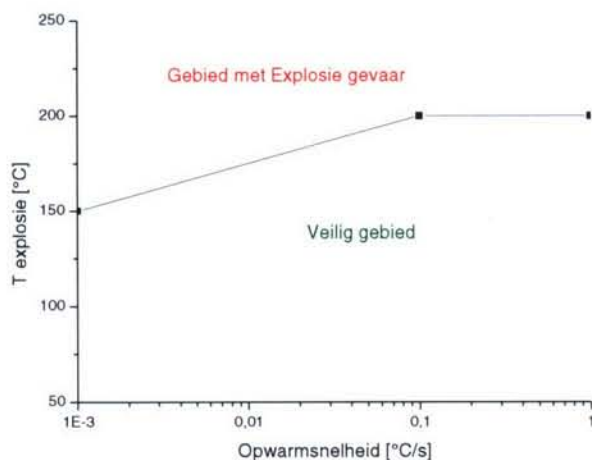
Uit eerdere berekeningen [3] en laboratorium experimenten met HMX houdende explosieve stoffen is af te leiden dat deze bij een opwarmsnelheid van ongeveer $0,001\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ een reactie temperatuur hebben bij $182\text{ }^{\circ}\text{C}$ en bij $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ boven de $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ met een lineair logaritmisch verband. Deze waarden zijn toegevoegd in figuur 4.13a.

Figuur 4.13a laat de explosietemperaturen van RDX, TNT en HMX als functie van de opwarmsnelheid zien. RDX reageert sneller, dat wil zeggen het RDX loopt bij een lagere temperatuur en een kortere tijd weg dan TNT of HMX. Daarom geeft RDX een goed beeld van de situatie in de worst case.



Figuur 4.13a Explosietemperatuur als functie van de opwarmsnelheid voor TNT en HMX ten opzichte van RDX voor een 120 mm granaat.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat voor de meest gangbare explosieven in conventionele munitie (RDX, HMX, TNT en comp B (RDX/TNT), Comp A3 (RDX) etc.) RDX de laagste waarde voor de explosietemperatuur geeft. Dit explosief geeft bij relatief lage opwarmsnelheid van $0,001\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ($3,6\text{ }^{\circ}\text{C/uur!}$) pas een reactie boven de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Experimenteel is al gevonden [3] dat een compositie waarin zich RDX bevindt nooit veel hoger dan bij $203\text{ }^{\circ}\text{C}$ zal reageren (bij hoge opwarmsnelheden). Ook voor veel moderne explosieven waarbij RDX en HMX als hoofdbestanddeel in een polymeren binder (HTPB) zijn ingebed (PBXen), gelden dezelfde getallen. In figuur 4.13b zijn de veilige en onveilige gebieden samengevat weergegeven. Ook een nieuw aangeschafte 155 mm munitie van Rheinmetall met de explosieve stof KS 32 valt onder deze richtlijnen.



Figuur 4.13b Samenvatting van de gebieden waarbij met de meest gangbare munitie gevaren bij brand verwacht kunnen worden en waar niet.

4.2 Berekeningen aan kruiten

4.2.1 Inleiding

In de verschillende typen munitie worden verschillende kruiten gebruikt, bijvoorbeeld single base, double base en triple base kruiten. Ook de hoeveelheid en het type stabilisator in het kruit kan per artikel verschillen. Bij de 155 mm granaat hoort een kardoes met kruit. Figuur 4.14 en 4.15 laten het kruit uit een kardoes, respectievelijk een kardoes zien.

Voor de 120 mm zijn twee typen mogelijk. De 120 mm mortieren worden afgevuurd met ringvormig kruit. De 120 mm patronen worden door kruit in een huls voortgedreven. Figuur 4.6 en figuur 4.7 in de vorige paragraaf tonen de 120 mm munitie. Deze voortdrijvende lading is gebaseerd op onder andere een double base propellant met een deel van de nitroglycerine vervangen door DEGDN (diethyleenglycoldinitraat).

Als voorbeeld van de 35 mm munitie wordt het brisantgranaatpatroon DM11 met stalen huls en schokbuis DM311 in schakelband genomen. De 35 mm brisantgranaatpatroon wordt gebruikt in het wapensysteem van de PantserRups Tegen Luchtdoelen (PRTL). De PRTL is uitgerust met 2 computergestuurde radargeleide 35 mm snelvuurkanonnen en wordt gebruikt voor de bescherming van onder meer bruggen en kwetsbare installaties tegen aanvallen vanuit de lucht. De afmetingen van de 35 mm staan vermeld in tabel 4.9. Figuren 4.16 tot en met 4.18 laten wat afbeeldingen zien van de 35 mm munitie.



Figuur 4.14 Kruit uit een white bag kardoes voor de 155 mm.



M4C4

Figuur 4.15 Kardoes om de granaat van de 155 mm weg te schieten.

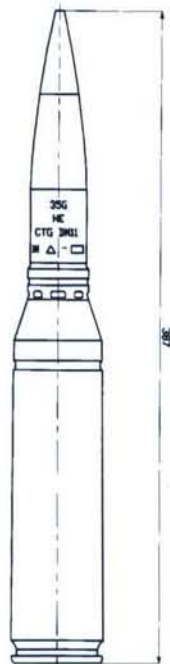
Tabel 4.9 Afmetingen 35 mm patroon.

Afmeting	in mm
lengte patroon	387
lengte granaat	188
lengte schokbuis	75
diameter granaat	35
diameter hulsbodem	54,6

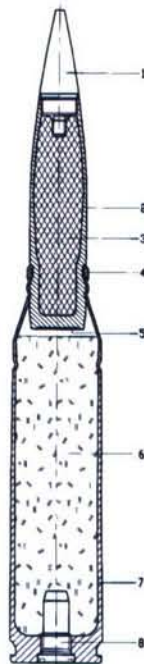


Figuur 4.16 Links: brisantgranaatpatroon DM 11, rechts: opslag van de patronen op pallet.

VS 9-947
B 07.01
blad 2



1 x wijz 01-03-93



afb 2 doorsnede

- 1 schokbuis DM311 (zie afb. 3)
- 2 granaatlichaam
- 3 springlading
- 4 geleiband
- 5 bodemplaat
- 6 voortdrijvende lading
- 7 patroonhuls
- 8 ontstekingsdop (zie afb. 4)

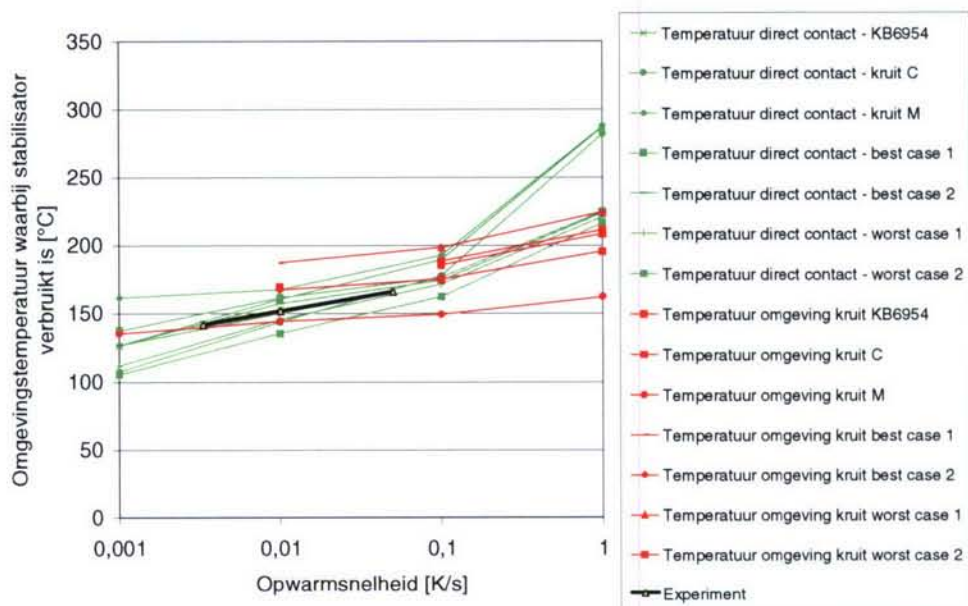
Figuur 4.17 Links: aanzicht van brisantgranaatpatroon DM 11, rechts: doorsnede van brisantgranaatpatroon.



Figuur 4.18 Patronen in een schakelband.

In paragraaf 3.2 werd al toegelicht dat de invoerparameters voor kruit lastig te bepalen zijn. Om deze redenen is ervoor gekozen om voor de voorgestelde 7 koppels van invoerparameters (kruit best case 1, kruit best case 2, kruit worst case 1, kruit worst case 2, KB6954, kruit C en kruit M) de tijd en waar mogelijk de temperatuur te bepalen voor een cilindrische vorm met een diameter van 120 mm. Tijdens de 1-dimensionale berekeningen bleek dat de bandbreedte van het kruit (best en worst case) zoals voorgesteld niet de explosietijden en temperaturen van de voorbeeldkruit (KB6954, kruit C en M) bevatte. Blijkbaar zijn de voorgestelde parameters niet breed genoeg om deze bandbreedte op te stellen. Ter vergelijking naast de resultaten uit het 1-dimensionale model is de omzetting van de stabilisator berekend. Deze omzetting is temperatuursafhankelijk en derhalve is bij verschillende opwarmsnelheden deze conversie bepaald.

Om de resultaten in tabelvorm aan te leveren zal te onoverzichtelijk worden. Daarom zijn de resultaten in een grote grafiek weergegeven (figuur 4.19) zodat een bandbreedte zichtbaar wordt waarbinnen de kruit reageren bij verschillende opwarmsnelheden. Figuur 4.19 bevat de opwarming via direct contact van het kruit (groene curves) en de temperaturen waarbij de stabilisator verbruikt is (rode curves). Om de bandbreedte te valideren zijn er experimenten uitgevoerd. In de volgende paragraaf worden de resultaten van de experimenten met het KRA1386 kruit gegeven. De resultaten zijn al opgenomen in onderstaande figuur.



Figuur 4.19 Vergelijking van temperatuur waarbij wegloop plaats vindt bij opwarming door direct contact (groen) en consumptie van de stabilisator (rood).

4.2.2 Experimenten met kruit van Gattling 30 mm Gun (KRA 1386)

Wereldwijd zijn er niet zoveel opwarmexperimenten uitgevoerd met kruiden om te bepalen bij welke temperatuur deze reageren. Om een indicatie te hebben van de responsie van kruiden is er nog een testserie uitgevoerd met de SCB [14] test met het Nitrocellulose kruit (single base) van Goalkeepermunitie (30 mm). Figuur 4.20 laat een SCB vaatje zien gevuld met dit kruit.



Figuur 4.20 Nitrocellulosekruit in een SCB vaatje (bovenaanzicht).

In figuur 4.21 is een typisch resultaat te zien na het experiment. Er heeft duidelijk een explosie plaats gevonden. In tabel 4.10 is het meetoverzicht gegeven van deze testserie. De resultaten zijn eveneens in het overzicht van figuur 4.19 terug te vinden. De experimentele gegevens vallen binnen de range van alle berekende resultaten.

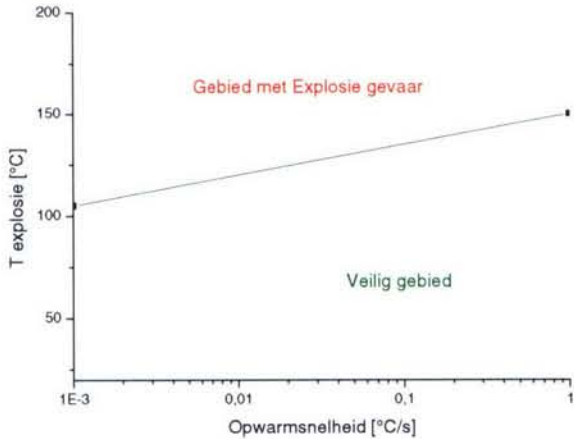
Tabel 4.10 Resultaten van de SCB testserie met KRA1386 kruit van de Goalkeepermunitie.

Opwarm snelheid [K/s]	Temperatuur van de wand [°C]
0,05	166, 169
0,01	152
0,0033	142



Figuur 4.21 Typische responsie van KRA 1386 kruit in een opwarmtest.

Samenvattend kan het volgende geconcludeerd worden. Uit de berekeningen, maar ook uit de experimentele gegevens blijkt dat kruiden eerder reageren bij opwarming dan de explosieven die in veel gangbare munitie zit. De geëxtrapoleerde waarde voor een opwarm snelheid van 0,001 °C/s van het kruit in de experimenten is ongeveer 125 °C en de berekening met de worst case is dit bij een opwarm snelheid van 0,001°C/s zelfs 105 °C. In hoeverre deze waarde echt reëel is, is niet precies in te schatten maar deze waarde kan zeker ook niet uitgesloten worden. Hierbij is het scheidingsgebied voor gevaar en geen gevaar een rechte lijn.



Figuur 4.22 Samenvatting van de gebieden waarbij met de meest gangbare kruiden gevaren bij brand verwacht kunnen worden en waar niet.

5 Afhangelijkheid van warmtegeleidbaarheid, warmtecapaciteit en dichtheid op de explosietemperatuur en -tijd

Om de afhankelijkheid van de thermische geleidbaarheid λ , de warmtecapaciteit en de dichtheid van het TNT op de cook-off tijd te onderzoeken, zijn met de overige eigenschappen uit [1], een opwarm snelheid van 0,1 K/s en een diameter 120 mm de cook-off tijden berekend een range van waarden. Deze waarden zijn de literatuurwaarden van deze parameters, een 50% kleinere, een 25% kleinere waarde, een 25% grotere en een 50% grotere waarde. Tabel 5.1 tot en met 5.3 geven overzichten aan van de gebruikte waarden voor λ , ρ en C_p en de berekende cook-off tijden.

Tabel 5.1 Cook-off tijden bij verschillende waarden voor de geleidbaarheid.

λ [W/m·K]	Afwijking in λ [%]	t_{explosie} [s]	Afwijking in t_{explosie} [%]
0,1046	-50	4658	-8
0,1569	-25	4888	-4
0,2092	0	5080	0
0,2615	+25	5241	3
0,3138	+50	5377	6

Overige parameters uit [1], opwarm snelheid is 0,1 K/s.

Tabel 5.2 Cook-off tijden bij verschillende waarden voor de dichtheid.

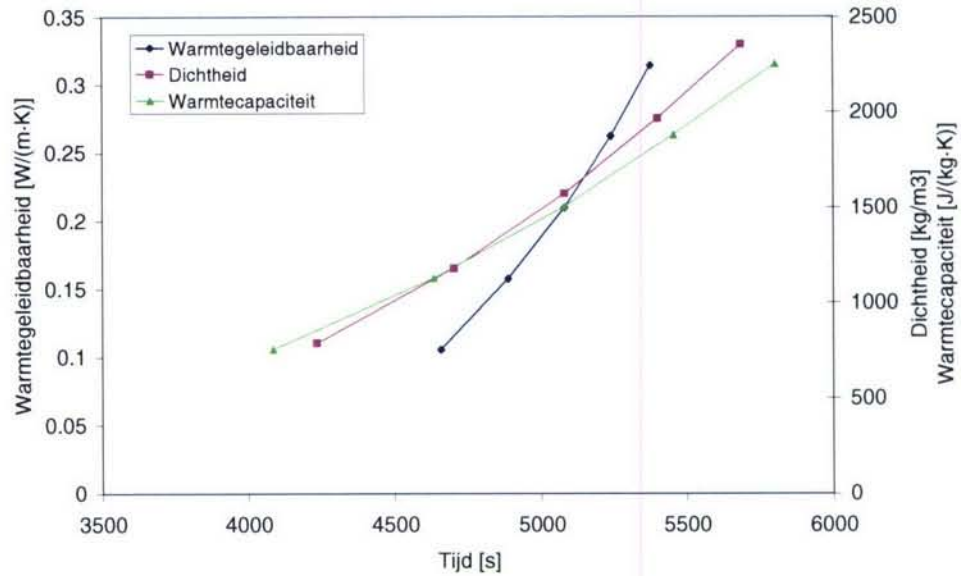
ρ [kg/m ³]	Afwijking in ρ [%]	t_{explosie} [s]	Afwijking in t_{explosie} [%]
785	-50	4237	-17
1177.5	-25	4704	-7
1570	0	5080	0
1962.5	+25	5402	6
2355	+50	5687	12

Overige parameters uit [1], opwarm snelheid is 0,1 K/s

Tabel 5.3 Cook-off tijden bij verschillende waarden voor de warmtecapaciteit.

C_p [J/kg·K]	Afwijking in C_p [%]	t_{explosie} [s]	Afwijking in t_{explosie} [%]
750	-50	4086	-20
1125	-25	4634	-9
1500	0	5080	0
1875	+25	5456	7
2250	+50	5804	14

Overige parameters uit [1], opwarm snelheid is 0,1 K/s.



Figuur 5.1 Spreiding van de cook-off tijden bij afwijkende warmtegeleidbaarheid, dichtheid en warmtecapaciteit.

Wanneer de variaties in de geleidbaarheid, de dichtheid en de warmtecapaciteit in figuur 5.1 bekeken worden, blijkt dat de variatie in cook-off tijd het minst is bij een variatie in de geleidbaarheid (λ). De variatie in warmtecapaciteit leidt tot de grootste variatie in cook-off tijd.

Bovenstaande resultaten laten zien dat de resultaten van het model niet sterk afhankelijk zijn van de parameters λ , ρ en C_p . In praktijk kunnen deze parameters goed binnen de bovenstaande nauwkeurigheid bepaald worden. De resultaten voor de responsie zullen dan ook betrouwbaar zijn.

6 Vergelijking tussen explosieven met hoog en laag RDX gehalte

Het vorige hoofdstuk behandelde een gevoeligheidsstudie van de parameters in het model. In dit hoofdstuk is voor een case de uitkomst van het model vergeleken met waarden uit de literatuur.

Scholtes et al. [9] hebben de cook-off temperatuur (de temperatuur van de wand op moment van exploderen van het monster), van een monster PBXN-109 (een veel gebruikt explosief voor gevechtssladingen) experimenteel bepaald. PBXN-109 bestaat uit 64 wt% RDX, 16 wt% binder, 20 wt% aluminium. In het model is dit gesimuleerd als een massieve cilinder met dezelfde diameter met de parameters van RDX met een gecorrigeerde waarde voor de reactiewarmte, namelijk 64 wt% in plaats van 85 wt%. RU81 bestaat voor 85 wt% uit RDX met 15 wt% binder.

Tabel 6.1 Stofafhankelijke eigenschappen van de explosieven gebruikt in de berekeningen.

Parameter	Symbool	Eenheid	RU81	PBXN-109
Warmtegeleidbaarheid	λ	W/(m·K)	0.25	0.25
Dichtheid	ρ	kg/m ³	1580	1580
Warmtecapaciteit	C_p	J/(kg·K)	1360	1360
Reactiewarmte	Q	J/kg	2088890·0.85 ¹	2088890·0.64 ¹
Pre-exponentiële coëfficiënt	Z	1/s	3,16228·10 ¹⁸	3,16228·10 ¹⁸
Activeringsenergie	E_a	J/mol	199000	199000
Explosietemperatuur	T_{explosie}	°C	203	203

¹ De compositie bestaat voor deze fractie uit het explosief.

Tabel 6.2 Rekenparameters voor het model.

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde
Opwarm snelheid	β	K/s	0,08333
Warmteoverdrachtscoëfficiënt	h	W/(m ² ·K)	8
Mogelijkheid tot opwarming	optie 1	-	1
Opwarming via vrije convectie of direct contact	optie 2	-	1
Mogelijkheid voor point of no return	optie 3	-	0
Mogelijkheid voor de stralingswarmte	optie 4	-	0
Straal van mogelijke 'bore' ¹	R_b	m	0
Straal van explosief ¹	R_p	m	0,0233
Straal van liner ¹	R_l	m	0,031725
Tijdstap	t	s	varieert
Starttemperatuur	T_{start}	K	293,15
Omgevingstemperatuur	T_{omg}	K	293,15

¹ In de berekeningen is aangenomen dat de cilinder uit alleen RDX bestaat en geen 'bore' of liner bevat.

Voor het RDX geldt dat zodra de temperatuur in het explosief boven de 203 °C komt de wandtemperatuur genomen wordt als temperatuur waarbij de cook-off plaats vindt. In tabel 6.3 staan de resultaten van de experimenten uit refencie. [9] en van de berekeningen. De resultaten zijn berekend met de opwarming van de wand bij direct contact aangezien bij het experiment een verwarmingsmantel de wand direct verwarmde.

Tabel 6.3 Lineaire opwarming RDX-PBX.

	Tijd [s]	T _{wand}
Experimenteel RDX PBXN-109	18953	179
Experimenteel i-RDX PBXN-109	19764	182
Model 64% RDX	19415	182
Model 85% RDX	19135	179

De berekende waarden van de tijd tot explosie en de temperatuur komen overeen met de gemeten waarden. Bovenstaande resultaten laten zien dat een lagere concentratie RDX in combinatie met aluminium ook goed benaderd wordt met het model. Het model kan dan ook gebruikt worden voor explosieven die minder RDX bevatten en meer niet-energetisch materiaal.

7 Bulkopslag kruit

De uitgevoerde berekeningen geven de temperatuur aan waarboven het artikel reageert bij opwarming van de afzonderlijke artikelen. De invloed van bulkopslag op de reactietijd en temperatuur is in dit hoofdstuk bekeken. Een volledige behandeling van deze theorie is gegeven in bijlage A.

7.1 Veilige opslag temperatuur voor kruit

De kritische omgevingstemperatuur voor een stapeling van kruit is bepaald met hulp van een simulatiemodel door Lont [1]. Een stapeling van twee lagen kruit in de hoogte van 5 bij 5 vaten is gesimuleerd. De warmtestroming in de ruimte tussen de vaten is gemodelleerd met behulp van een effectieve warmtegeleidingcoëfficiënt van $1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Het kruit zit opgeslagen in een fiberdrum met de volgende afmetingen: hoogte = 630 mm, diameter = 355 mm met wanddikte = 2,3 mm.

Tabel 7.1 Kritische temperaturen van 1 vat kruit en een stapeling van vaten kruit.

KB6954	
$T_{\text{kritisch}} 1 \text{ drum}^*, T_1 [^{\circ}\text{C}]$	82,0
$T_{\text{kritisch}} 2*5*5 \text{ drums}^*, T_s [^{\circ}\text{C}]$	68,6
Vershil (T_1-T_s) [$^{\circ}\text{C}$]	13,4

* Drum: diameter = 355 mm, height = 630 mm.

De simulatie laat zien dat de kritische temperatuur van bulkopslag lager ligt dan de kritische temperatuur van de afzonderlijke drums kruit, zie tabel 7.1. De stapel had een 10°C tot 15°C lagere kritische omgevingstemperatuur dan een enkel vat. De laagste kritische omgevingstemperatuur uit de simulaties is circa 50°C .

7.2 T_{cr} volgens Boddington simulatie kubus

Een tweede bulkopslag is gesimuleerd met een model beschreven in bijlage A. De bulkopslag is gesimuleerd als een kubus van $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$. Met de gegevens van het kruit met naam KB6954 wordt met de zogenaamde formule van Kamanetski [3] een waarde van de kritische temperatuur van $78,0^{\circ}\text{C}$ gevonden terwijl met een eindige elementen methode ABAQUS een waarde van $77,9^{\circ}\text{C}$ wordt gevonden. Om het temperatuur profiel te berekenen wordt de zogenaamde methode van Boddington gebruikt. Samenvattend zegt deze:

De methode van Boddington is geldig in het Frank-Kamenetskii regiem. Uit de berekeningen blijkt dat een 5° orde benadering nodig is. Bij een 2° orde benadering wijken de kritische temperaturen teveel af in vergelijking met de berekeningen uit ABAQUS. Een 5° orde benadering geeft betere resultaten. In tabel 7.2 staan de kritische temperaturen weergegeven. De afstand van het nulpunt tot het punt van de berekening is weergegeven als ρ . De gebruikte parameters zijn opgenomen in tabel 7.3. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een kubus met een ribbe van $0,5 \text{ m}$.

Tabel 7.2 Temperatuurprofiel kubus voor 5^e orde benadering van Boddington.

ρ	T (K)	T (°C)	ρ	T (K)	T (°C)
0,00	363,02	89,87	0,52	358,38	85,23
0,04	362,99	89,84	0,56	357,78	84,63
0,08	362,89	89,74	0,60	357,17	84,02
0,12	362,72	89,57	0,64	356,55	83,40
0,16	362,50	89,35	0,68	355,93	82,78
0,20	362,21	89,06	0,72	355,30	82,15
0,24	361,87	88,72	0,76	354,67	81,52
0,28	361,48	88,33	0,80	354,04	80,89
0,32	361,05	87,90	0,84	353,40	80,25
0,36	360,57	87,42	0,88	352,77	79,62
0,40	360,06	86,91	0,92	352,13	78,98
0,44	359,52	86,37	0,96	351,48	78,33
0,48	358,96	85,81	1,00	350,82	77,67

Tabel 7.3 Parameters gebruikt in de berekening volgens de methode van Boddington.

λ	J/(msK)	0,08
ρ	kg/m ³	840
Q	J/kg	1
Z	1/s	$5,782 \cdot 10^{16}$
E_a	J/mol	$1,227 \cdot 10^5$

Bovenstaande waarden zijn de fysische eigenschappen van het kruit KB 6954, zoals ook gesimuleerd als kruit B in [10].

Duidelijk is voor bulkopslag dat de kritische temperatuur, waarbij een kruit langzaam begint te reageren, al rond de 70 graden kan (out of area situaties) liggen, afhankelijk van het kruit. Als deze opslagtemperatuur lang gehandhaafd blijft kan dit leiden tot een weglööpreactie van het kruit en dus een gevaarlijke situatie. Theoretisch duurt het zo'n 230 dagen voordat dit echt weglööpt, echter de kwaliteit van het kruit zal hierdoor drastisch achteruitgaan. Bij hogere temperaturen zal dit nog sneller gaan.

8 Conclusies en aanbevelingen

De grootste oorzaak bij ongelukken met munitie is brand. Met name conventionele munitie geeft in een brand of in de nabijheid van brand grote gevaren voor omgeving en personeel. Hoe te handelen bij brand wordt ondermeer omschreven in de richtlijnen van MP 40-21 en de brandweeropleiding Brandmeester. In deze studie is getracht enkele methoden aan te geven om deze richtlijnen aan te passen. Na enkele bezoeken van munitie opslag bij Defensie, een literatuuronderzoek naar de chemische componenten van belang bij munitie in een brand zijn de voorhanden rekenspreadsheet en een 1-dimensionale code aangepast om berekeningen uit te voeren aan 35, 120 en 155 mm munitie die voorradig is bij de KL. Behoudens explosieve stoffen is er ook gekeken naar voortdrijvende ladingen van dit soort munitietypen. De volgende conclusies kunnen getrokken worden.

Het wordt aanbevolen om wel camera's en temperatuursensoren te plaatsen zodat op afstand mogelijke opwarming geïdentificeerd kan worden en de aard en locatie van deze opwarming bepaald kan worden. Na aflezing van de geregistreerde temperatuur en de daaruit afgeleide opwarmsnelheid kan eventueel besloten worden of er nog actie genomen wordt om de brand te blussen of dat er op een afstand van 1000 m gewacht wordt totdat een eventuele explosie heeft plaatsgevonden.

Om een benadering te krijgen voor de tijd die men nog heeft om in te grijpen wanneer munitieartikelen met explosieven opwarmen kan de worst case grens van RDX aangehouden worden. Voor gevechtssladingen ligt deze grens op de lijn van 150 °C bij een opwarming van 0,001 K/s lineair naar 200 °C bij een opwarming van 0,1 K/s en opwarmsnelheden daar boven. De tijd die daarmee gepaard gaat is afhankelijk van de temperatuur op moment van aflezen en de opwarmsnelheid. Kruiden reageren bij lagere temperaturen. Voor artikelen met kruid ligt deze grens lager, van 105 °C naar 150 °C bij snelheden van 0,001 K/s tot 1 K/s. Voor munitie in een directe brand is uiterste voorzichtigheid geboden. Tijden van minder dan 1 minuut zijn niet vreemd.

Om een beter overzicht van de kruiden te krijgen zal een grotere variatie van 'snel reagerende kruiden' bekeken moeten worden.

De meest gangbare explosieven in conventionele munitie (RDX, HMX, TNT en comp B (RDX/TNT), Comp A3 (RDX et cetera). kunnen benaderd worden met de berekening van RDX. Dit geeft namelijk de laagste waarde. Dit geldt ook voor veel moderne PBXen met als hoofdbestanddeel RDX, HMX of TNT en bindersystemen als HTPB. Ook bijvoorbeeld de moderne 155 munitie van Rheinmetall (met KS32) valt binnen deze normen, net als munitie met het veelgebruikte 'blast' explosief PBX-N109.

Het ontwikkelde model om de temperaturen te bepalen is niet sterk afhankelijk van de parameters λ , ρ en C_p . In praktijk kunnen deze parameters goed binnen de bovenstaande nauwkeurigheid bepaald worden. De resultaten voor de responsie zullen dan ook betrouwbaar zijn.

Voor bulkopslag ligt de kritische temperatuur waarbij een kruit langzaam begint te reageren al rond de 70 graden, afhankelijk van het kruit. Als deze opslagtemperatuur lang gehandhaafd blijft kan dit leiden tot een weglööpreactie van het kruit en dus een gevaarlijke situatie. Theoretisch duurt het zo'n 230 dagen voordat dit echt weglööpt. Echter de kwaliteit van het kruit zal hierdoor drastisch achteruitgaan. Bij hogere temperaturen versnelt dit proces en zal de levensduur snel achteruit gaan. Hierdoor kunnen eveneens gevaarlijke situaties ontstaan.

9 Referenties

- [1] Lont, J.C., 'De invloed van stapeling van vaten kruit op de veilige opslag-temperatuur', TNO-rapport PML221092237, 1992/1993.
- [2] Interne rapportage, bezoekverslag ABWM te Oldebroek en MMC te Veenhuizen d.d. 27 en 28 juli 2004.
- [3] Scholtes, J.H.G.; M.N. Boers en V. Verboom, 'Rekenmethoden om de tijd tot een explosie van munitie in of in de nabijheid van vuur te schatten', TNO-rapport PML 2004-A29, 2005.
- [4] Scholtes, J.H.G. en V. Verboom, 'Veiligheidsverhogende maatregelen op schepen met betrekking tot munitie', intern TNO-rapport uit 2006.
- [5] MP 40-21: Voorschriften voor opslag van gevaarlijke stoffen, Ministerie van Defensie.
- [6] Brandweeropleiding Brandmeester, Hoofdstuk 8, Techniek en tactiek van de brandbestrijding bij bijzondere incidenten.
- [7] Kodde, ing. H.H., 'Brandbestrijding op munitiemagazijnen complexen. Deelrapport 1: Inventarisatie en literatuurstudie van de brandbestrijdings-procedures', TNO-rapport PML 1994-A78.
- [8] Kodde, ing. H.H., 'Brandbestrijding op munitiemagazijnen complexen. Deelrapport 2: Voorstel voor richtlijnen bij brandmelding', TNO-rapport PML 1995-A110.
- [9] Scholtes, J.H.G. en A.E.D.M. van der Heijden, 'IM related and laboratory scale testing in I-RDX and RDX-based explosives', IMEMTS symposium, San Francisco USA, 2004.
- [10] Phillips, R.W., C.A. Orlick en R. Steinberger, 'The kinetics of the thermal decomposition of nitrocellulose', Journal of Physical Chemistry, Vol. 59, Oktober 1955, p.1034-1039.
- [11] Victor, A.C., 'Exploring cookoff mysteries', Victor Technology, JANNAF Propulsion Systems Hazards Subcommittee Meeting, San Diego, California, 1-5 August 1994.
- [12] Scholtes, J.H.G., 'Cook-off experimenten met de TNO-PML SCB bij verschillende opwarmsnelheden', TNO-rapport PML 1995-A15.
- [13] Frota, O. en A. Bailey, 'Small scale cook-off studies of explosives', Shrivenham, United Kingdom. Personal.
- [14] 'Recommendation of transport of dangerous goods'. Test and criteria, second edition, st/sg/ac.10/1 rev.1, United nations, New York 1990.

10 Ondertekening

Rijswijk, september 2007

TNO Defensie en Veiligheid



dr. ir. J.L. Verolme
Afdelingshoofd



ir. J.H.G. Scholtes
Auteur



ir. V. Verboom
Auteur

A Berekening thermische explosiekubus

A.1 Inleiding

De theorie van een thermische explosie is in de eerste helft van vorige eeuw ontwikkeld door Semenov¹ en Frank-Kamenetskii². Het verschil tussen beide benaderingen is dat bij Semenov de inwendige temperatuur van het lichaam constant is en een temperatuursverschil bestaat tussen lichaam en omgeving, terwijl bij Frank-Kamenetskii er een temperatuursgradiënt bestaat in het lichaam terwijl de oppervlakte-temperatuur gelijk wordt gesteld aan de omgevingstemperatuur. De Frank-Kamenetskii benadering is het meest realistisch in het geval van stoffen met een lage warmtegeleidingcoëfficiënt, zoals explosieve stoffen en de meest recente theorieën zijn daarom op dit principe gebaseerd. De meeste theorieën zijn gebaseerd op de Frank-Kamenetskii parameter δ die gedefinieerd is voor de drie geometrisch simpele configuraties waarin de temperatuur een functie is van slechts één coördinaat: de bol, de oneindige cylinder en de oneindige vlakke plaat. Deze parameter wordt gegeven door:

$$\delta = \frac{\sigma Q A E a^2 e^{-E/RT_A}}{\lambda R T_A^2} \quad (\text{A.1})$$

waarin a de straal of halfbreedte is, T_A de omgevingstemperatuur, R de gasconstante, E de activeringsenergie, σ de dichtheid, Q de reactiewarmte per massa-eenheid, A de Arrheniusfactor en λ de warmtegeleidingscoëfficiënt.

Voor andere geometrieën is het in principe niet mogelijk om de temperatuurprofielen als functie van slechts één coördinaat te geven. Het is in dat geval ook niet mogelijk een algemene analytische oplossing te geven. Numerieke oplossingen voor gedefinieerde gevallen zijn uiteraard wel mogelijk, maar het bepalen van de kritische condities is een vrij omslachtige operatie en levert weinig inzicht in de thermische eigenschappen op. Om hieraan het hoofd te bieden is door Boddington et al.³ een benaderende algemene oplossing gegeven voor een bepaalde klasse van voorwerpen voor het Frank-Kamenetskii regiem. Deze benadering is van toepassing op voorwerpen die een symmetriecentrum hebben en waarbij een lijn vanuit het centrum het oppervlak slechts éénmaal snijdt. Hierbij wordt de oplossing gegeven in termen van een enkele variabele ρ die is gedefinieerd als volgt: $\rho(P)$ is de afstand van het punt P in het lichaam tot het symmetriecentrum van dat lichaam, gedeeld door de afstand van het centrum O tot het oppervlak S in de richting OP . Op deze manier wordt voor het lichaam een 'equivalente bol' gecreëerd waarop de thermische explosie theorie wordt toegepast.

Algemene oplossing volgens Boddington

Bij gebruik van de volgende definities:

$$\Theta \equiv \frac{E}{RT_A^2} (T - T_A) \quad (\text{A.2})$$

met $\Theta_0 = \Theta$ in centrum,

ρ = dimensieloze afstand (0 in centrum; 1 op grensvlak)

$$\text{en} \quad \frac{1}{R_0^2} \equiv \frac{1}{4\pi} \iint \frac{d\omega}{r^2} \quad (\text{A.3})$$

(R_0 is de afstand r van het centrum tot het grensvlak, gemiddeld over 4π steradianen),
wordt de algemene oplossing gegeven door:

$$\Theta = \Theta_0 - 2 \ln \left[\sum_{n=0}^{\infty} b_n (y\rho^2)^n \right] \quad (\text{A.4})$$

$$e^{\Theta_0/2} \equiv X_1 = \sum_{n=0}^{\infty} b_n y^n \quad (\text{A.5})$$

$$\delta(R_0) = 12 \frac{(j+1)}{3} \frac{y}{X_1^2} \quad (\text{A.6})$$

Hierbij is:

$$\delta(R_0) \equiv \gamma R_0^2 \quad (\text{A.7})$$

$$\text{met:} \quad \gamma \equiv \frac{\sigma Q A E e^{-E/RT_A}}{\lambda R T_A^2} \quad (\text{A.8})$$

Deze definitie sluit aan bij de definitie van die van Frank-Kamenetskii gegeven in (A.1)

waarbij geldt: $\delta_{FK} \equiv \delta(a) = \gamma a^2 = \frac{a^2}{R_0^2} \delta(R_0)$ met a = halfbreedte, straal, et cetera.

Door Boddington wordt de dimensieloze temperatuur Θ dus uitgedrukt als een machtreeks in $y\rho^2$ waarbij de coëfficiënten b worden gegeven door:

$$b_0 = b_1 = 1$$

$$(n+1)(2n+j+1)b_{n+1} = \sum_{s=0}^n (n-s)(4s-2n+3-j)b_{s+1}b_{n-s} \quad (n \geq 1) \quad (\text{A.9})$$

$$\text{met:} \quad j \equiv 3 \frac{R_0^2}{a^2} - 1 \quad (\text{A.10})$$

j is de zogenaamde vormparameter die bepaald wordt door de vorm van het voorwerp, terwijl de parameter y afhankelijk is van Θ_0 en j en bepaald wordt door de rand-

voorwaarden. Volgens Boddington geldt dat als de reeks afgekapt wordt bij $n=5$ de fout ten opzichte van de exacte oplossing zeer klein is, terwijl ook bij afkappen van de reeks bij $n=2$ de benadering nog zeer goed is.

A.2 Vergelijking met analytische oplossing

Door onder andere Bowes⁴ is een analytische afleiding gegeven van het temperatuur-profiel voor het Frank-Kamenetskii regiem voor de gevallen waarbij dit exact oplosbaar is (oneindige vlakke plaat, oneindige cylinder, bol). Voor de oneindige vlakke plaat is dan de oplossing:

$$\Theta = \Theta_0 - 2 \ln \cosh \left(\rho \sqrt{\frac{\delta e^{\Theta_0}}{2}} \right) \quad (\text{A.11})$$

$$X_1 = e^{\Theta_0/2} \quad (\text{A.12})$$

of:

$$\Theta = \Theta_0 - 2 \ln \cosh \left(\sqrt{\frac{\delta X_1^2 \rho^2}{2}} \right) \quad (\text{A.13})$$

Om nu te bekijken hoe goed Boddington en Bowes overeenkomen in dit geval is de algemene oplossing van Bowes geschreven als een machtreeks in yp^2 en vergeleken met de reeks van Boddington. Voor dit geval geldt dat $j = 0$ dus volgt uit (A.6) dat $\delta = 4y/X_1^2$. Wanneer dit wordt gesubstitueerd in vergelijking (A.13) van Bowes en de cosh als een machtreeks wordt geschreven is het resultaat:

$$\Theta = \Theta_0 - 2 \ln [1 + yp^2 + 1/6 (yp^2)^2 + 1/90 (yp^2)^3 + 0,000362 (yp^2)^4 + \dots] \quad (\text{A.14})$$

Uit de recursieve relaties (A.9) voor de coëfficiënten b_i van Boddington volgen in dit geval voor de waarden van b_i : $b_0 = 1$; $b_1 = 1$; $b_2 = 1/6$; $b_3 = 1/90$; $b_4 = 0,000397$, waardoor de oplossing van Boddington er als volgt uitziet:

$$\Theta = \Theta_0 - 2 \ln [1 + yp^2 + 1/6 (yp^2)^2 + 1/90 (yp^2)^3 + 0,000397 (yp^2)^4 + \dots] \quad (\text{A.15})$$

De twee oplossingen blijken dus in dit geval overeen te komen voor een flink aantal termen in de machtreeks, pas in de 4^e orde term treedt een klein verschil op, zodat het er op lijkt dat de theorie van Boddington inderdaad de juiste resultaten oplevert voor de exact analytisch te berekenen gevallen. Dit geeft vertrouwen voor de toepasbaarheid van deze theorie in andere, meer complexe gevallen.

Kritische waarde

Uit de thermische explosie theorie volgt dat de kritische toestand wordt bereikt als geldt:

$$\frac{d\delta}{d\Theta_0} = 0 \quad (\text{A.16})$$

ofwel:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (2n-1) b_n y_{cr}^n = 1 \quad (\text{A.17})$$

In geval we ons beperken tot een 2^e orde benadering, die volgens Boddington al goede resultaten moet opleveren, resulteert dit in de volgende uitdrukkingen voor de kritische waarden van de diverse grootheden:

$$y = (X_1 - 1)[1 - b_2(X_1 - 1)] \quad (\text{A.18})$$

$$X_{1,cr} = \frac{1}{4}(j + 7) \quad (\text{A.19})$$

$$\Theta_{0,cr} = 2 \ln\left(\frac{1}{4}(j + 7)\right) \quad (\text{A.20})$$

$$y_{cr} = \frac{1}{32}(j + 3)(j + 7) \quad (\text{A.21})$$

$$\delta_{cr}(R_0) = \frac{3(2j + 6)}{j + 7} \quad (\text{A.22})$$

A.3 Toepassing op kubus

De vormparameter j kan direkt via vergelijkingen (A.3) en (A.10) berekend worden. Voor een groot aantal geometrieën is in appendix 2 van Boddington deze berekening al uitgevoerd. Voor de kubus geldt:

$$\frac{3a^2}{R_0^2} = 1 + \frac{2}{\pi}\sqrt{3} \quad \Rightarrow \quad R_0 = 1,19447 a \quad (a = \text{halve as van kubus}) \quad (\text{A.23})$$

Hieruit volgt dat $j = 3,2803$ en zijn de coëfficiënten b_i :

$$b_0 = b_1 = 1; \quad b_2 = -0,18154; \quad b_3 = 0,064612; \quad b_4 = -0,030556; \quad b_5 = 0,017192$$

Als we de 2^e orde benadering gebruiken worden de kritische waarden voor de kubus gegeven door:

$$\begin{aligned} X_{1,cr} &= 2,570 \\ \Theta_{0,cr} &= 1,8878 \\ y_{cr} &= 2,0175 \\ \delta_{cr}(R_0) &= 3,6654 \quad (\Rightarrow \quad \delta_{cr}(a) = 2,5690) \end{aligned}$$

Dit passen we nu toe op een kubus, met een ribbe van 0,5 m ($a = 0,25$ m) en we gebruiken de volgende waarden voor de parameters van de explosieve stof:

$$E = 1,227 \cdot 10^5 \text{ J/mol}; \quad A = 5,782 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}; \quad Q = 1 \text{ J/kg}; \quad \sigma = 840 \text{ kg/m}^3; \quad \lambda = 0,08 \text{ J/s/m/K}; \\ R = 8,314 \text{ J/mol/K}$$

Hieruit volgt voor de kritische waarden:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0,29862 \text{ m} \\ T_{A,cr} &= 351,25 \text{ K} = 78,10 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{0,cr} &= 367,03 \text{ K} = 93,99 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

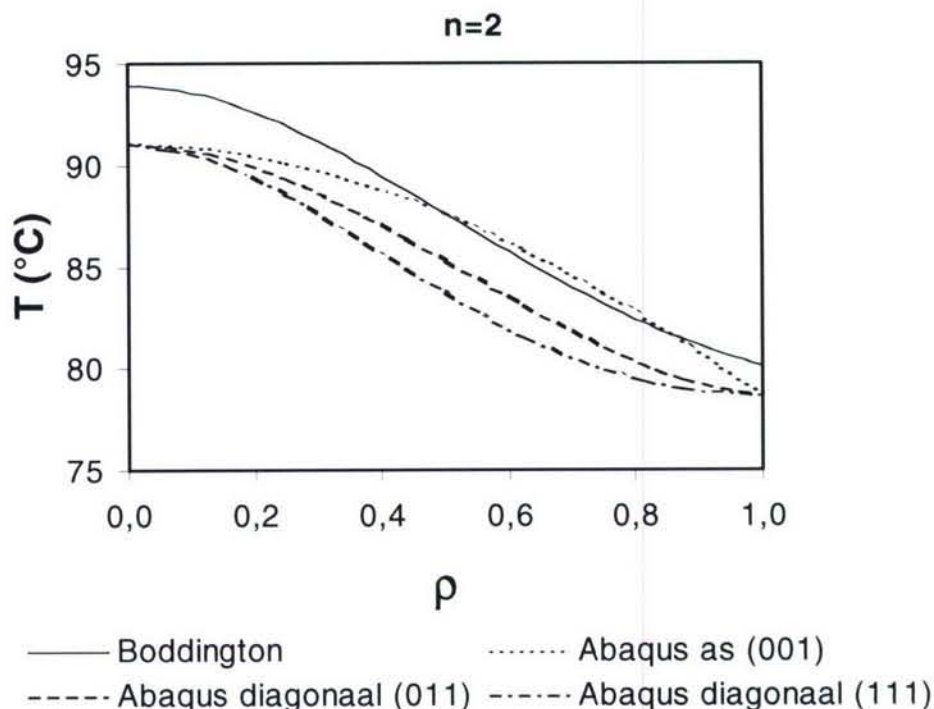
Het temperatuurprofiel kan nu ook berekend worden en de resultaten zijn gegeven in tabel A.1 en figuur A.1. Ter vergelijking is tevens in figuur A.1 de uitkomst van een numerieke simulatie getekend, uitgevoerd met ABAQUS voor dezelfde materiaalparameters en met gebruikmaking van een rooster van 9 x 9 x 9 roosterpunten voor 1/8 kubus. De Boddingtonbenadering levert éézelfde profiel op in alle richtingen, terwijl dit in de realiteit en ook in 3D ABAQUS simulatie niet zo is. Van de ABAQUS simulatie zijn de profielen getekend langs de as, langs de 011-diagonaal en langs de 111-diagonaal.

De Boddington lijn ligt over het algemeen een paar graden boven de ABAQUS lijnen. Bij nadere studie blijkt echter dat in dit geval vergelijking (A.17) voor y_{cr} geen reële oplossing heeft voor $n = 2$ en oplossing (A.18) is in dit geval dan ook niet correct. Het gevolg is dat het profiel met name voor $\rho \rightarrow 1$ niet klopt. Hoewel Boddington beweert dat de 2^e orde benadering al goede resultaten geeft blijkt dat voor dit specifieke geval toch niet te kloppen en is een hogere orde benadering noodzakelijk.

Tabel A.1 Temperatuurprofiel kubus voor 2^e orde benadering van Boddington.

ρ	θ	T (K)	T (°C)
0,00	1,8878	367,03	93,88
0,04	1,8814	366,98	93,83
0,08	1,8622	366,82	93,67
0,12	1,8308	366,56	93,41
0,16	1,7880	366,20	93,05
0,20	1,7348	365,75	92,60
0,24	1,6723	365,23	92,08
0,28	1,6020	364,64	91,49
0,32	1,5251	364,00	90,85
0,36	1,4430	363,31	90,16
0,40	1,3571	362,60	89,45
0,44	1,2686	361,86	88,71
0,48	1,1786	361,10	87,95

ρ	θ	T (K)	T (°C)
0,52	1,0882	360,35	87,20
0,56	0,9984	359,60	86,45
0,60	0,9100	358,86	85,71
0,64	0,8237	358,14	84,99
0,68	0,7403	357,44	84,29
0,72	0,6603	356,77	83,62
0,76	0,5844	356,14	82,99
0,80	0,5130	355,54	82,39
0,84	0,4466	354,98	81,83
0,88	0,3857	354,47	81,32
0,92	0,3307	354,01	80,86
0,96	0,2822	353,61	80,46
1,00	0,2407	353,26	80,11



Figuur A.1 Temperatuurprofielen kubus voor 2^e orde benadering van Boddington en zoals berekend met behulp van Abaqus.

Bij een 5^e orde benadering worden de kritische waarden gegeven door:

$$\sum_{n=1}^5 (2n-1)b_n y_{cr}^n = 1 \Rightarrow y_{cr} = 1,25625$$

$$X_{1,cr} = \sum_{n=0}^5 b_n y_{cr}^n = 2,0784$$

$$\Theta_{0,cr} = 2 \ln(X_{1,cr}) = 1,4632$$

$$\delta_{cr}(R_0) = 12 \frac{y_{cr}}{X_{1,cr}^2} = 3,4898$$

$$T_{A,cr} = 350,82 \text{ K} = 77,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

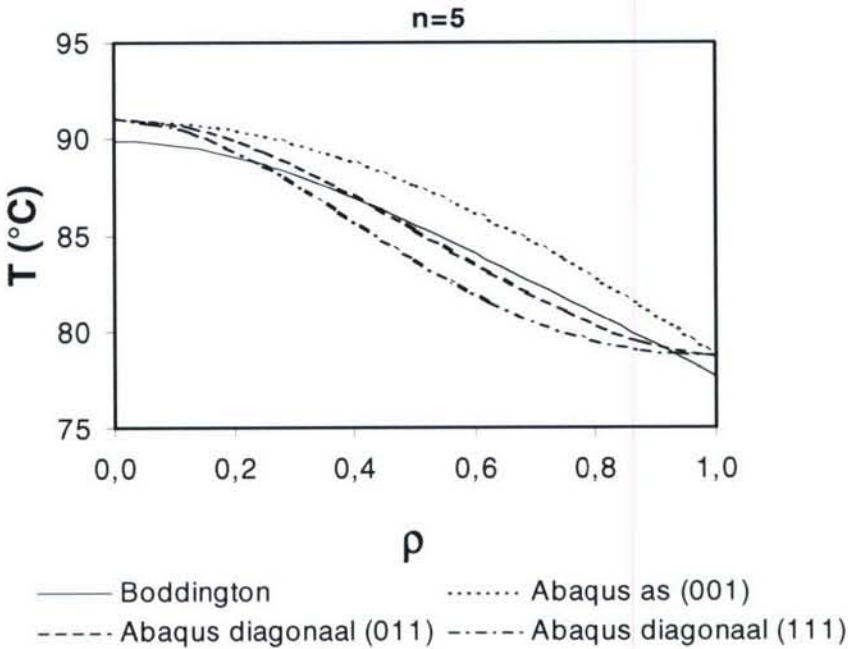
$$T_{0,cr} = 363,02 \text{ K} = 89,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$T_{A,cr}$ en vooral $T_{0,cr}$ zijn nu een stuk lager dan in het geval van de 2^e orde benadering. Het temperatuurprofiel voor dit geval is gegeven in tabel A.2 en figuur A.2. Het profiel ziet er nu goed uit, houdt ongeveer het midden tussen de verschillende door ABAQUS berekende profielen en ligt ongeveer 1 °C onder het door ABAQUS berekende profiel langs de as.

Tabel A.2 Temperatuurprofiel kubus voor 5^e orde benadering van Boddington.

ρ	θ	T (K)	T (°C)
0,00	1,4632	363,02	89,87
0,04	1,4592	362,99	89,84
0,08	1,4472	362,89	89,74
0,12	1,4275	362,72	89,57
0,16	1,4003	362,50	89,35
0,20	1,3660	362,21	89,06
0,24	1,3252	361,87	88,72
0,28	1,2784	361,48	88,33
0,32	1,2263	361,05	87,90
0,36	1,1694	360,57	87,42
0,40	1,1083	360,06	86,91
0,44	1,0438	359,52	86,37
0,48	0,9763	358,96	85,81

ρ	θ	T (K)	T (°C)
0,52	0,9065	358,38	85,23
0,56	0,8347	357,78	84,63
0,60	0,7615	357,17	84,02
0,64	0,6873	356,55	83,40
0,68	0,6124	355,93	82,78
0,72	0,5370	355,30	82,15
0,76	0,4614	354,67	81,52
0,80	0,3856	354,04	80,89
0,84	0,3096	353,40	80,25
0,88	0,2334	352,77	79,62
0,92	0,1566	352,13	78,98
0,96	0,0790	351,48	78,33
1,00	0,0000	350,82	77,67



Figuur A.2 Temperatuurprofielen kubus voor 5e orde benadering van Boddington en zoals berekend met behulp van Abaqus.

Referenties

¹ N.N. Semenov, Z. Phys. Chem. 42, 571, 1928.
² D.A. Frank-Kamenetskii, Acta Phys.-Chim. URSS 20, 729, 1945.
³ T. Boddington, P. Gray en D.I. Harvey, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 270, 467, 1971.
⁴ P.C. Bowes, 'Self-heating: evaluating and controlling the hazards', Elsevier, 1984.

ONGERUBRICEERD
REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD2007-0149	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO -	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO TNO-DV 2007 A315
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 014.16225	5. CONTRACT NO -	6. REPORT DATE September 2007
7. NUMBER OF PAGES 48 (incl 1 appendix, excl RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 14	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Response of munitions items due to heating or a fire (Responsie van verschillende munitieartikelen bij opwarming en brand)		
11. AUTHOR(S) J.H.G. Scholtes, MSc V. Verboom, MSc		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Defence, Security and Safety, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) MoD/DS/CLAS/St-CLAS/Dir OPOST, P.O. Box 90004, 3509 AA Utrecht, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) Safety of munitions for personnel and ordnance in all kinds of situations is important. One of the major threats for munitions is heating of munitions (cook-off), direct (fire) as well as indirect heating (fire in adjacent room). In this study the time to cook-off for several munitions items has been investigated by means of simple 1-dimensional calculations. These calculations have been performed on in-service munitions items, from 35 mm up to 155 mm, with fillings as HMX, RDX and TNT or a combination of this. Also research has been carried out on gun propellants in general. From these results, guidelines have been given to improve the regulations for fire fighting as written in MP 40-21 'Voorschrift voor opslag van gevaarlijke stoffen' or the 'Brandweeropleiding Brandmeester'.		
16. DESCRIPTORS Cook-Off Thermal heating		IDENTIFIERS Time-to-explosion Computer simulation -
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

ONGERUBRICEERD

Distributielijst

Onderstaande instanties/personen ontvangen een volledig exemplaar van het rapport.

- | | |
|-------|---|
| 1 | DMO/SC-DR&D
(inclusief digitale versie op cd-rom) |
| 2/3 | DMO/DR&D/Kennistransfer |
| 4 | Programmabegeleider Defensie
Directie Ruimte, Milieu en Vastgoedbeleid
ir. H.C. van Arkel |
| 5/9 | Projectbegeleider Defensie
DS/CLAS/St-CLAS/Dir OPOST
afdeling Facilitymanagement
G.B. Cornelisse |
| 10/12 | Bibliotheek KMA |
| 13 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk
Manager Bescherming, Munitie en Wapens (operaties), ir. P.J.M. Elands |
| 14 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Bescherming, Munitie en Wapens (kennis), ir. W. Karthaus |
| 15 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Bescherming, Munitie en Wapens (markt), dr. ir. L.H.J. Absil |
| 16 | Programmaleider TNO Defensie en Veiligheid
TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk
Business Unit Bescherming, Munitie en Wapens,
ir. G.C. Reeling Brouwer |
| 17/19 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Business Unit Bescherming, Munitie en Wapens,
ir. V. Verboom
dr. ir. R.H.B. Bouma
ir. J.H.G. Scholtes |

Onderstaande instanties/personen ontvangen het managementuittreksel en de distributielijst van het rapport.

- 4 ex. DMO/SC-DR&D
- 1 ex. DMO/ressort Zeesystemen
- 1 ex. DMO/ressort Landsystemen
- 1 ex. DMO/ressort Luchtsystemen
- 2 ex. BS/DS/DOBBP/SCOB
- 1 ex. MIVD/AAR/BMT
- 1 ex. Staf CZSK
- 1 ex. Staf CLAS
- 1 ex. Staf CLSK
- 1 ex. Staf KMar
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Algemeen Directeur,
ir. P.A.O.G. Korting
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Operaties, ir. C. Eberwijn
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Kennis, prof. dr. P. Werkhoven
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, Directie
Directeur Markt, G.D. Klein Baltink
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Manager Waarnemingssystemen (operaties), ir. B. Dunnebier
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Manager Informatie en Operaties (operaties), ir. P. Schulein
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk,
Manager Biologische en Chemische Bescherming (operaties), ir. R.J.A. Kersten
- 1 ex. TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg,
Manager Gedrag, Training en Prestatie (operaties), drs. H.J. Vink